F923 F823
620.9 (498)
621.311 (498)
KAT

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÂNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Institut. de Documentare Tehnică
BUCUREŞTI
OBMEN - SCHIMB
VYMĚNA - WYMIANA
TAUSCH - CHANGE

ANUL III
1953

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÂNE

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÂNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

Országos Műszaki Könyvtár
TULAJDONA

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

ANUL III
1953

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÂNE

COMITETUL DE REDACȚIE

ACADEMICIAN I. S. GHEORGHIU — Redactor responsabil; E. ARIE; M. MARINESCU, Membru corespondent al Academiei R.P.R.; S. TRESTIANU; GH. BĂRĂNESCU; M. BERCOVICI, Membru corespondent al Academiei R.P.R.; T. TĂNĂSESCU, Membru corespondent al Academiei R.P.R.

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÂNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul III 1953

SUMAR

ENERGETICĂ GENERALĂ

Pag.

I. SAPHIER, Cercetările ştiinţifice din domeniul energeticii în ajutorul construcţiei oraşelor socialiste în R.P.R 7

ELECTROENERGETICĂ

P. DIMO, Cauza supratensiunilor « prelungite » în reţelele cu neutru izolat 15

F. MANEA, Verificarea prin calcul a supratensiunii prelungite posibile, în ipoteza rezonanţei, pentru reţele cu neutru izolat 97

A. AVRAMESCU şi S. MASTERO, Incălzirea la scurtcircuite a conductorilor de aluminiu 127

P. POSTELNICU, Metoda pentru localizarea rapidă a defectelor de impedanţă din liniile de telecomunicaţii 185

CEZAR PARTENI ANTONI, Studiu tehnico-economic pentru ameliorarea factorului de putere 195

NOTE 223

DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ PE ANUL 1952 231

RECENZII 239

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÂNE

ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE
INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome III 1953

SOMMAIRE

ÉNERGÉTIQUE GÉNÉRALE

Page

I. SAPHIER, L'aide apportée par les recherches scientifiques du domaine de l'énergétique à l'édification des villes socialistes de la République Populaire Roumaine 7

ÉLECTROÉNERGÉTIQUE

P. DIMO, Les surtensions « prolongées » dans les réseaux à haute tension dont le neutre est isolé 15

F. MANEA, La vérification par le calcul de la surtension prolongée, possible dans l'hypothèse de la résonance, pour des réseaux dont le neutre est isolé 97

A. AVRAMESCU et S. MASTERO, L'échauffement des conducteurs d'aluminium par court-circuit 127

P. POSTELNICU, Méthode de localisation rapide des défauts d'impédance des lignes de télécommunication 185

CEZAR PARTENI ANTONI, Étude technique et économique pour l'amélioration du facteur de puissance 195

NOTES 223

APERÇUS SUR L'ACTIVITÉ DE L'INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE EN 1952..... 231

COMPTES-RENDUS 239

ÉDITIONS DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том III 1953

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЕНЕРГЕТИКА

Стр.

И. САФИР, Научные исследования в области энергетики на помощь стройке социалистических городов в Румынской Народной Республике 7

ЕЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

П. ДИМО, Причина «длительных» перенапряжений в цепях с изолированным нулевым проводом 15

Ф. МАНЯ, Расчетная проверка длительного перенапряжения возможного, в предположении резонанса, в случае сетей с изолированной нейтралью 97

А. АВРАМЕСКУ и С. МАСТЕРО, Нагрев алюминиевых проводов при коротком замыкании 127

П. ПОСТЕЛЬНИКУ, Метод быстрой локализации импедансных аварий на линиях дальней связи 185

ЦЕЗАРЬ ПАРТЕНИ АНТОНИ, Технико-экономическое исследование улучшения коэффициента мощности 195

ЗАМЕТКИ 223

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ИНСТИТУТА ЭНЕРГЕТИКИ ЗА 1952 ГОД 231

РЕЦЕНЗИИ 239

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ENERGETICĂ GENERALĂ

CERCETĂRILE ŞTIINŢIFICE DIN DOMENIUL ENERGETICII ÎN AJUTORUL CONSTRUCŢIEI ORAŞELOR SOCIALISTE ÎN R. P. R.

DE

I. SAPHIER

Construirea socialismului în ţara noastră se desfăşoară sub acţiunea legii economice fundamentale a socialismului. După cum a arătat I. V. Stalin, această lege poate fi exprimată în felul următor: « asigurarea satisfacerii maxime a nevoilor materiale şi culturale mereu crescânde ale întregii societăţi prin creşterea şi perfecţionarea neîntreruptă a producţiei socialiste pe baza tehnicii celei mai înalte »[1]).

Construcţia şi reconstrucţia oraşelor noastre, oraşe ce trebue să devină oraşe socialiste care « să asigure cele mai bune condiţii de existenţă pentru oamenii muncii şi satisfacerea maximală a necesităţilor lor zilnice de trai »[2]) contribue într'o măsură importantă la satisfacerea în măsură maximă a nevoilor social-culturale ale întregii populaţii urbane.

Contrastul dintre oraşele din ţările capitaliste şi cele din U.R.S.S. reiese în mod izbitor din raportul C.C. al Partidului Comunist (b) al U.R.S.S. făcut de I. V. Stalin la Congresul al XVII-lea: « O trăsătură invariabilă a marilor oraşe din ţările burgheze o constitue cocioabele, aşa numitele cartiere muncitoreşti dela marginea oraşelor, care reprezintă o îngrămădire de încăperi întunecoase, umede, de cele mai multe ori în subsoluri, pe jumătate năruite, unde de obicei se adăposteşte lumea nevoiaşă, înnotând în murdărie şi blestemându-şi soarta. Revoluţia din U.R.S.S. a dus la noi la dispariţia acestor cocioabe. Ele au fost înlocuite cu cartiere muncitoreşti noi, bine amenajate şi luminoase; şi adeseori cartierele noastre muncitoreşti sunt mai frumoase decât centrul oraşului »[3]). Oraşul socialist este un oraş fără periferie.

Intr'o economie socialistă unde totul este subordonat interesului general al celor ce muncesc, se deschid largi posibilităţi pentru reconstrucţia oraşelor existente şi construirea de noi mari centre locuite. Planurile de sistematizare, construcţie şi reconstrucţie a centrelor populate au putere de lege şi executarea lor devine obligatorie.

In ţările capitaliste, construcţia şi reconstrucţia oraşelor se caracterizează prin anarhie, prin construirea numai a acelor clădiri care pot aduce profituri capita-

---

[1]) I. Stalin, *Problemele economice ale socialismului în U.R.S.S.*, Ed. pentru Literatură Politică, 1952, p. 45.

[2]) Hotărîrea C.C. al P.M.R. şi a Consiliului de Miniştri al R.P.R. cu privire la construcţia şi reconstrucţia oraşelor şi organizarea activităţii din domeniul arhitecturii, Ed. pentru Literatură Politică, 1952, p. 11.

[3]) I. Stalin, *Opere*, Ed. P.M.R., 1952, v. 13, p. 354.

liştilor, printr'o totală lipsă de grijă faţă de nevoile materiale şi culturale ale omului muncitor; aceasta este consecinţa influenţei economiei guvernate de legea fundamentală a capitalismului contemporan — legea asigurării profitului capitalist maximal.

Planurile de reconstrucţie a oraşelor în ţările capitaliste, în măsura în care conţin anumite elemente progresiste, sunt destinate a rămâne veşnic pe hârtie, sau sunt denaturate în cursul realizărilor. Este semnificativă aprecierea unei publicaţii engleze de specialitate asupra planului de reconstrucţie a Londrei — plan elaborat după cel de-al doilea război mondial — şi anume « Se naşte presupunerea că autorii reconstrucţiei propuse a City-ului se străduiau înainte de toate să evite ocuparea de noi terenuri şi să se atingă cât mai puţin de limitele existente ale proprietăţii prîvate »[1]).

Desvoltarea vertiginoasă a industriei noastre aduce după sine şi o creştere corespunzătoare a populaţiei urbane. In U.R.S.S., în legătură cu ritmul rapid al industrializării, procentul populaţiei urbane a crescut numai în perioada 1926—1939 dela 17,9% la 32,8%. La noi, ea a crescut dela 3.800.000 — în anul 1948 — la 5.500.000 — la începutul anului 1953 — şi se prevede că la sfârşitul anului 1960 ea va atinge peste 7 milioane[2]). Apare astfel necesitatea construirii de noi oraşe, în special în regiunile lăsate în urmă de către vechile regimuri burghezo-moşiereşti, regiuni care azi sunt în curs de a fi puternic industrializate. Apare de asemenea necesitatea reconstrucţiei oraşelor existente.

Transformarea oraşelor existente în oraşe socialiste şi construirea de noi oraşe socialiste arată grija permanentă purtată de Partid şi Guvern oamenilor muncii.

Oraşele socialiste, pe lângă că trebue să asigure confortul maximal, vor trebui să cuprindă o serie de întreprinderi şi instituţii care să elibereze munca vie cheltuită în activitatea domestică. Astfel sunt bucătăriile-fabrici, fabricile de pâine, spălătoriile mecanice centrale, instituţiile de educare socială a copiilor etc.

In gospodării se introduc o serie de maşini care uşurează munca, se desfiinţează treptat încălzitul cu sobe individuale, se introduce gazul pentru gătit, electricitatea capătă aplicaţii din ce în ce mai largi în gospodăria casnică.

Alimentarea cu energie a viitoarelor noastre oraşe socialiste trebue trecută deci pe o bază cu totul nouă, trebue pusă în concordanţă cu cerinţele economiei socialiste, cu cerinţele omului nou. Va trebui deci ca întregul nostru sistem de alimentare cu energie a oraşelor să fie reconsiderat şi, pe baza unui studiu amănunţit, să se ajungă, în cadrul politicii energetice generale, la politica energetică comunală care să traseze principiile de alimentare cu energie a oraşelor.

Toate acestea ridică probleme a căror rezolvare cade în sarcina unor instituţii centrale ca, de exemplu, Comitetul de Stat al Planificării, Comitetul de Stat pentru arhitectură şi construcţii, Sfaturile Populare etc., precum şi în sarcina unor institute de cercetare. In cele ce urmează, se încearcă o prezentare generală a problemei alimentării cu energie a oraşelor socialiste şi se caută a se scoate în evidenţă sarcinile ce revin cercetării ştiinţifice din domeniul energeticii.

★

Alimentarea cu energie a oraşului serveşte la acoperirea necesarului de energie a industriilor şi întreprinderilor comunale, precum şi a populaţiei şi gospodăriei comunale. Energia este cerută sub formă de energie electrică şi de căldură. Can-

[1]) Journal of the town planning Institute, 1945, Nr. 6, p. 207.

[2]) Gh. Gheorghiu-Dej, *Cuvântare rostită la Congresul fruntaşilor din Gospodăriile Agricole Colective*, Ed. pentru Literatură Politică, 1953.

titatea de energie necesară alimentării orașelor reprezintă cam o cincime din cantitatea de energie necesară alimentării întregii economii naționale. Astfel, în viitor, în planul de electrificare a R.P.R., dintr'un total de 7.000 de milioane kWh produși, se prevede un necesar de 1270 milioane kWh pentru servicii comunale (luminatul străzilor, tramvaie, troleibuze, alimentări cu apă etc.) și pentru consumul domestic, birouri și magazine. In ceea ce privește consumul de combustibil pentru populație și gospodăria comunală, în 1940 acesta a fost în U.R.S.S. de 21,5% din totalul combustibilului consumat de întreaga economie națională.

Cantitatea de energie cu care trebue să fie alimentate orașele nu este deci cătuși de puțin neglijabilă, și în consecință rezolvarea problemei alimentării cu energie a orașelor trebue făcută cu o grije deosebită.

La soluționarea problemei alimentării cu energie a orașelor socialiste trebue să se pornească dela cerințele legii economice fundamentale a socialismului. Ținând seama de perspectiva pe 15—20 de ani, soluțiile vor trebui elaborate pentru fiecare oraș în parte, căutându-se a se îmbina utilizarea la maximum a resurselor locale cu cele de interes republican, iar în cadrul balanței generale energetice va trebui să se găsească ponderile pentru fiecare purtător de energie în parte în cadrul sistemului energetic al orașului. Va trebui să se caute:

— obținerea unui preț de cost minim pentru forma de energie respectivă,
— posibilitatea unui preț de tarif minim pentru energia livrată locuitorilor,
— obținerea unui confort maxim.

Orașul necesită energie electrică și căldură, aceasta din urmă atât la temperatură joasă, pentru încălzit și spălat, cât și la temperatură ridicată, pentru gătit. Dacă alimentarea cu energie electrică, luată separat, nu prezintă probleme speciale decât prevederea de suficientă putere instalată în sistem, alimentarea cu căldură ridică probleme cu totul speciale și încă slab abordate la noi în vederea soluționării lor în spirit socialist.

La rezolvarea problemei alimentării cu căldură trebue făcută distincția între alimentarea cu căldură la temperatură joasă și alimentarea cu căldură la temperatură înaltă.

TABLOUL Nr. 1

Soluția adoptată	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
Randamentul total %....	60—45	34	55	38	71	60	—	23	71
Consum specific de combustibil convențional kg/mil kcal	240—318	420	260	375	200	240	185	620	200

Alimentarea cu căldură la temperatură joasă este necesară în special pentru încălzitul încăperilor. Aceasta poate fi în general realizată prin următoarele:

a) sobe individuale încălzite cu combustibil solid,
b) sobe individuale încălzite cu gaz,
c) încălzire centrală cu cărbuni sau lignit,
d) încălzire centrală cu gaze,
e) încălzire centralizată de cartier, dela cazane cu cărbuni, lignit sau turbă aduse dela mică distanță,
f) încălzire centralizată de cartier, dela cazane, cu gaze aduse dela mare distanță,
g) termoficare,

h) sobe individuale electrice, consumând energia electrică produsă de o centrală cu condensaţie pură,

i) sobe individuale electrice consumând energia electrică produsă de o hidrocentrală.

Pentru compararea acestor soluţii din punct de vedere energetic, se dă în tabloul Nr. 1, pentru fiecare soluţie în parte, ordinea de mărime pentru randamentul total al exploatării sursei primare de energie [1]) şi echivalentul consumului de combustibil convenţional pentru un milion de kcal util obţinute [2]).

Consumul cel mai mic de energie primară se obţine în cazul termoficării. Urmează apoi încălzirea centralizată cu combustibil solid, adus dela mică distanţă. Soluţia sobelor electrice consumând energie electrică hidraulică nu poate fi luată în considerare, dacă în contul acestui consum trebue să se producă în altă parte energie electrică pe cale termică.

Consumul cel mai mare de energie primară îl prezintă soluţia încălzirii electrice dela o centrală de pură condensaţie şi încălzirea cu gaze în sobe individuale.

Criteriul randamentului nu poate fi însă considerat ca unicul criteriu valabil. Considerentele de ordin tehnico-economic sunt acelea care trebue să indice în ultimă instanţă soluţia optimă. Astfel, cu toate că termoficarea pare a fi cel mai avantajos sistem de încălzire, necesarul de metal (pentru conductele termice) sau prezenţa unui număr mare de mici clădiri existente (în cadrul reconstrucţiilor) poate ca în anumite cazuri şi în anumite perioade să nu permită alegerea acestei soluţii. Pentru alegerea sistemului optim de încălzire trebue ca, pentru fiecare caz în parte, să fie întocmite studii ample, în care problema să se reflecte sub toate aspectele ei, ţinându-se seama de resursele energetice ale regiunii respective.

Vor trebui astfel cercetate în mod special legăturile posibile cu energetica industriilor de pe lângă oraşul respectiv. De asemenea trebue studiate condiţiile climatologice, mijloacele de transport, resursele energetice locale, preţul de cost şi de tarif etc., toate acestea înglobate într'un studiu complex.

Dacă alimentarea cu căldură la temperatură joasă se poate face şi centralizat, permiţând deci, în anumite condiţii, o aprovizionare centralizată, alimentarea cu căldură la temperatură înaltă a caselor de locuit şi a întreprinderilor comunale nu se poate face practic cu ajutorul unui purtător de căldură, din care cauză alimentarea se face descentralizat. In aceasta constă marea deosebire dintre alimentarea cu căldură la temperatură joasă şi înaltă.

Alimentarea cu căldură la temperatură înaltă este necesară pentru gătit şi poate fi în general rezolvată prin următoarele:

a) maşini de gătit cu combustibil solid (lemn sau cărbuni),
b) maşini de gătit cu gaze,
c) maşini de gătit electrice,
d) lămpi de gătit cu petrol sau primuse.

Pentru comparaţia din punct de vedere energetic se pot considera ca ordin de mărime datele din tabloul Nr. 2.

---

[1]) Randamentul total este considerat ca raportul dintre căldura util obţinută în instalaţia de încălzire a încăperilor şi energia conţinută în sursa primară (consumul de energie cu transportul este socotit ca o pierdere).

[2]) După E. F. Broschi, *Roli gaza i teplofikaţii v teplosnabjenii gorodov*. Tehniceschie problemî teplofikaţii, Gosenergoizdat, Moscva-Leningrad, 1952, p. 10—16 *(a, b, c, d, e, g* şi *h)*, după L. Musil, *Praktische Energiewirtschaftslehre*, Springer, Viena, 1949, *(f* şi *i)*.

Soluţia cea mai avantajoasă este gătitul cu gaze. Pineînţeles, după cum s'a arătat mai sus, şi aici trebue luaţi în considerare toţi ceilalţi factori tehnici şi economici, înainte de a se putea da o soluţie definitivă. Gătitul cu lemne apare ca fiind cel mai neeconomic [3]).

TABLOUL Nr. 2

Soluţia adoptată	*a*	*b*	*c*	*d*
Randamentul maşinii % [1])	10..15	50..55	75..80	30..40
Consum specific de combustibil convenţional kg/mil kcal utile	1430..950	285..260	950..900 [2])	480..360

★

La deplina reuşită a reconstrucţiei socialiste a oraşelor existente şi a construcţiei de noi oraşe, rezolvarea justă a problemei alimentării cu energie joacă un rol important. Rezolvarea acestei probleme trebue făcută în lumina politicii energetice generale a ţării, în perspectiva următorilor 15...20 de ani, ţinând seama de introducerea tehnicii noi în vederea asigurării unor condiţii higienice optime şi a unui maxim de confort.

In ţara noastră, la oraşe, consumul de lemne pentru gătit şi încălzit se ridică la peste 10 milioane m^3 anual. Această situaţie nu este justă din punctul de vedere al folosirii raţionale a combustibilului şi nu permite o cruţare a pădurilor noastre, care au fost supuse unei exploatări de jaf de către vechile regimuri burghezo-moşiereşti. De asemenea, consumul de combustibil lichid pentru calorifere se ridică la peste 100.000 de tone anual. Şi aici se cere o analiză amănunţită în vederea eliberării unor cantităţi importante de produse petrolifere.

Bogatele resurse de combustibil de care dispunem pot fi folosite în mod raţional pentru alimentarea cu energie a oraşelor noastre. Cărbunii, gazele naturale, gazele de sondă, turba etc. ne stau toate la dispoziţie; trebue însă ca în prealabil să existe o continuă preocupare şi o matură gândire pentru utilizarea lor în modul cel mai raţional.

Energetica sovietică ne stă la dispoziţie cu bogata ei experienţă. Termoficarea şi utilizarea complexă energo-chimică a combustibililor pot da în anumite cazuri, soluţii foarte avantajoase. Astfel, extragerea părţilor volatile din cărbune, înainte ca el să fie ars pe grătarele unei centrale de termoficare, permite alimentarea unui oraş cu energie electrică, gaze şi apă caldă. Acesta este un exemplu în care întreaga alimentare cu energie a oraşului se face centralizat dintr'o singură uzină.

In ţara noastră, înainte de a se pune problema găsirii unor soluţii noi, se cere în special însuşirea temeinică a experienţei sovietice şi aplicarea acestei experienţe la specificul nostru, în vederea obţinerii soluţiilor optime pentru fiecare caz în parte, considerat în ansamblul energetic al întregii regiuni respective.

---

[1]) După E. O. Steinhaus, Voprosî energosnabjenia v planirovche gorodov, Gosudarstvenoe izd., Moscova-Leningrad, 1952.

[2]) Considerând o centrală termică cu condensaţia pură şi un randament global, inclusiv transportul şi distribuţia 20%.

[3]) Abstracţie fac maşinile de gătit electrice, consumând energie electrică produsă într'o centrală hidraulică — soluţie care privită în ansamblul economiei naţionale nu este eficace decât în cazul unui exces de energie hidraulică.

Cercetarea ştiinţifică în această direcţie trebue intensificată, Institutului de Energetică al Academiei R.P.R. revenindu-i un rol important în această privinţă. Vor trebui abordate în special următoarele probleme mai importante:

— analiza ştiinţifică a consumurilor de energie ale oraşelor existente şi stabilirea ritmului de creştere a acestor consumuri în viitorii 15...20 de ani,
— studiul încadrării optime a energeticii comunale în cadrul energeticii generale a regiunii respective şi posibilităţile folosirii maxime a resurselor energetice ale regiunii,
— studiul termoficării urbane şi posibilităţile de aplicare la oraşele existente care se vor reconstrui şi în special la noile oraşe socialiste,
— studiul reţelelor termice,
— studiul ştiinţific al diferitelor sobe de încălzit şi gătit şi stabilirea de tipuri de sobe cu randament optim pentru diverşi combustibili,
— studiul alimentării oraşelor cu gaze de gazogen sau dela centrale termoelectrice la care cărbunelui i se dă o utilizare complexă energo-chimică,
— studiul combustibililor inferiori în vederea obţinerii unui combustibil casnic superior (înobilare, brichetare),
— studiul alimentării cu frig (ghiaţă şi depozite frigorifere),
— studiul folosirii pierderilor de căldură din industriile de pe lângă marile oraşe în vederea încălzirii serelor,
— studiul energeticii transportului urban.

Rezolvarea acestor probleme va aduce, pe lângă contribuţia respectivă la reuşita reconstrucţiei socialiste a oraşelor existente şi a construcţiei de noi oraşe, o însemnată economie de combustibil şi o diminuare a volumului de transport pe cale ferată a combustibilului destinat populaţiei oraşelor, încadrând energetica comunală în politica generală energetică a ţării.

Unele din aceste probleme au fost abordate de Institutul de Energetică al Academiei R.P.R., ca termoficarea urbană, studiul reţelelor termice, utilizarea gazului metan la autobuze, obţinerea de frigorii prin destinderea gazului în turbine etc. Studiile de până acum nu pot fi considerate însă ca suficiente, ele dând numai unele soluţii parţiale din punctul de vedere al ansamblului.

Cercetările ştiinţifice privind energetica comunală vor trebui să ia o amplă desvoltare şi vor trebui aplicate în concret pentru fiecare oraş în parte, ţinând seama de toţi factorii creaţi de condiţiile locale.

In felul acesta, cercetarea ştiinţifică din domeniul energeticii va putea contribui activ la realizarea construcţiei şi reconstrucţiei socialiste a oraşelor noastre, în lumina sarcinilor trasate de Hotărîrile C.C. al P.M.R. şi ale Consiliului de Miniştri privitoare la aceste probleme.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ НА ПОМОЩЬ СТРОЙКЕ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ ГОРОДОВ В РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В связи с важными решениями, вынесенными партией и правительством относительно постройки и восстановления городов, а также относительно общего плана социалистического восстановления города Бухареста и постройки метро в нем, автор указывает на вклад, который должны внести научные исследования в области энергетики для выполнения намеченных задач.

Автор рассматривает в общих чертах вопрос снабжения энергией социалистических городов и различные виды энергии, необходимые городу, использование их, а также необходимость разрешения различных задач, касающихся научно-исследовательских институтов и некоторых учреждений.

Автор указывает на основные задачи, которые должны быть разрешены с помощью научных исследований в области энергетики, на основании передового советского опыта, а также специфических условий страны.

L'AIDE APPORTÉE PAR LES RECHERCHES SCIENTIFIQUES DU DOMAINE DE L'ÉNERGÉTIQUE À L'ÉDIFICATION DES VILLES SOCIALISTES DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

(RÉSUMÉ)

Par suite des importantes décisions que le Parti et le Gouvernement ont prises, au sujet de la construction et reconstruction des villes, au sujet du plan général de reconstruction socialiste de la ville de Bucarest et de la construction du métropolitain de Bucarest, on montre la contribution que la recherche scientifique dans le domaine de l'énergétique doit apporter à la réalisation des tâches assignées.

Dans cet article, on traite d'une façon générale le problème de la fourniture d'énergie aux villes socialistes, et l'on indique les différentes formes d'énergie nécessaires à une ville, leurs usages et la nécessité de résoudre certains problèmes qui s'imposent aux Instituts de Recherches et à certaines autres institutions.

En conclusion, on indique les principaux problémes auxquels la recherche scientifique du domaine de l'énergétique doit apporter une solution, basée sur l'expérience soviétique avancée et sur les conditions spécifiques de la République Populaire Roumaine.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ELECTROENERGETICĂ

CAUZA SUPRATENSIUNILOR «PRELUNGITE» ÎN REŢELELE CU NEUTRU IZOLAT

DE

P. DIMO

I. SUPRATENSIUNILE «PRELUNGITE» ÎN REŢELELE DE ÎNALTĂ TENSIUNE CU NEUTRU IZOLAT ŞI CRITICA CONCEPŢIEI ACTUALE ASUPRA NATURII LOR

Termenul «supratensiuni prelungite» se referă la acele supratensiuni de natură internă, care apar la reţelele cu neutru izolat şi care au un oarecare caracter de durată. Ele sunt explicate prin apariţia aşa numitului «arc intermitent» în punctul unde accidental o fază a fost pusă la pământ.

Necesitatea imperioasă de a se limita întinderea reţelelor cu neutru izolat (şi deci mărimea curentului capacitiv la pământ în caz de defect pe o fază) a fost recunoscută în prima perioadă a desvoltării reţelelor electrice. In acea vreme, reţelele de înaltă tensiune cu neutru izolat au fost obiectul a numeroase defecte şi străpungeri de izolaţie, atunci când atingeau o anumită desvoltare, din cauza fenomenului de supratensiune prelungită care apărea în anumite împrejurări în cazul atingerii unei faze cu pământul şi care producea defecte simultane în puncte foarte diferite ale reţelei.

Aceste supratensiuni prelungite au prezentat mult timp un caracter misterios, deoarece dacă s'ar fi putut explica cu uşurinţă o supratensiune trecătoare, care poate apărea la orice comutaţie în momentul iniţial, durata în timp era însă greu de explicat. Această menţinere în timp este partea periculoasă care conduce la străpungerea izolaţiei, în special pe celelalte două faze (sănătoase), în locuri foarte diverse. Defectele în puncte depărtate de locul accidentului duc iniţial la concluzia evidentă că supratensiunea este foarte întinsă în spaţiu şi cuprinde o bună parte din reţea.

Pentru fazele sănătoase, valoarea acestei supratensiuni faţă de pământ constatată în practică este egală cu 1,73—3,5 E (tensiunea simplă) şi numai foarte rareori este mai mare. Astfel, în cazuri izolate ea a atins şi mai mult (până la 7 E), dar chiar la valori reduse supratensiunea este foarte primejdioasă din cauza duratei lungi în timp.

In general, se socoteşte periculoasă această supratensiune pentru valori foarte joase, chiar în jurul lui 2 E_n (E_n fiind tensiunea simplă de serviciu, în regim normal, a reţelei respective). Reţelele de cabluri cu o oarecare vechime pot fi periclitate pentru valori începând dela cca 1,9 E_n a tensiunii fazelor faţă de pământ, dacă această tensiune se menţine un timp mai îndelungat.

La linii aeriene, unde în caz de furtună conturnările de izolatori şi deci şi scurtcircuitele la pământ pot apărea cu foarte mare uşurinţă, asemenea fenomene pot fi foarte frecvente. Astfel, o conturnare de izolator pe o fază poate produce o supratensiune de *durată* pe întreaga reţea, supratensiune susţinută de un fenomen intern, adică având cauza directă în interiorul reţelei (iar nu în descărcarea atmosferică, care a produs arcul de conturnare iniţial).

Caracterul « intern » al acestor supratensiuni de durată a fost recunoscut chiar la începutul desvoltării reţelelor, deoarece fenomenul apărea identic şi atunci când arcul la pământ avea o cauză oarecare pe timp senin (un contact accidental).

In cazul când apărea fenomenul de supratensiune prelungită, arcul la pământ se menţinea un timp îndelungat, adică tot timpul cât dura şi supratensiunea. Acest fenomen este considerat şi astăzi ca fiind cel mai grav caz de supratensiune a reţelelor cu neutru izolat şi i se atribue drept cauză aşa numitul « arc intermitent ».

Semnul apariţiei lui sunt defectele « multiple » care îl însoţesc şi care reprezentau în trecut cazul de avarie cel mai grav al reţelelor cu neutru izolat.

Menţionăm că, din cauza acestei supratensiuni prelungite, s'a trecut la tratarea neutrului, la reţelele de înaltă tensiune, deoarece s'a observat, după oarecari încercări, că fenomenul dispare la reţelele cu neutru tratat. In prezent, este definitiv stabilit că reţelele de înaltă tensiune depăşind o anumită lungime, sau un anumit curent capacitiv (în caz de defect la pământ), trebue să fie neapărat legate (într'un mod oarecare) cu neutru la pământ, pentru a se evita supratensiunile prelungite în caz de defect pe o fază.

Acest *lucru se face neapărat la reţelele aeriene de înaltă tensiune depăşind 60 kV*, unde conturnările de izolatori (deci şi scurtcircuitele la pământ) sunt fenomene frecvente şi unde în trecut s'a observat în mod special acest fenomen.

La reţelele subterane cu tensiuni mai joase, sunt încă multe reţele cu neutru izolat, chiar cu o capacitate apreciabilă faţă de pământ, reţele dintre care unele mai prezintă încă supratensiunea generală şi prelungită menţionată mai sus, iar altele nu (marea majoritate).

Motivul pentru care reţelele subterane au rămas încă în această stare, este că la aceste reţele nu au loc conturnările de izolatori ca la cele aeriene, conturnări care constitue o cauză principală şi frecventă pentru amorsarea fenomenului. Un alt motiv este că la tensiuni mai joase, ca în cazul reţelelor subterane, s'a dovedit prin experienţa câştigată până astăzi că fenomenul apare mai rar, şi atunci numai pentru valori ale curentului capacitiv (în caz de punere la pământ) mult mai mari, valorile supratensiunii prelungite, fiind mai mici. Totuşi în această problemă nu s'a dovedit încă nimic precis şi menţionăm că în multe reţele cu valori mari ale curentului capacitiv la pământ (peste 200 A) fenomenul nu a apărut de loc.

Pe de altă parte, în multe reţele subterane s'a întărit izolaţia cablurilor într'o măsură suficientă pentru ca ea să reziste şi la supratensiunea prelungită, în cazul când aceasta ar apare, lucru care a cerut investiţii apreciabile.

Totuşi, fenomenul mai există şi astăzi în multe reţele şi continuă să provoace pagube, acolo, unde nu s'au luat încă măsurile necesare.

In ceea ce priveşte cazurile precise când acest fenomen apare, lucrurile sunt până în prezent foarte confuze. Se ştie numai în mod precis că, de obicei, fenomenul apare atunci când capacitatea reţelei respective faţă de pământ este mare, cu observaţia totuşi că multe reţele care au capacitatea mare (chiar foarte mare), faţă de pământ, pot să nu prezinte acest grav inconvenient, în cazul când neutrul lor a rămas izolat.

De asemenea, în aceeași rețea, în care fenomenul a apărut odată, la un contact accidental cu pământul, se observă cazuri în care contacte similare cu pământul nu mai reproduc supratensiunea prelungită sau o reproduc la o altă valoare.

Vom vedea mai departe că explicația acestor fenomene pe baza « arcului intermitent », acceptată în general astăzi, nu lămurește deloc aceste « capricii » ale fenomenului, deoarece supratensiunea ar trebui să apară, oridecâteori sunt prezente condițiile care îi explică cauza.

Să rezumăm foarte pe scurt explicația prin arc intermitent.

Această explicație își are originea în faptul că la rețelele de înaltă tensiune cu neutru izolat, arcul de conturnare al izolatorilor se menținea un timp îndelungat atunci când apărea fenomenul și anume atât cât dura și supratensiunea. De altfel se poate crede întotdeuna că contactul cu pământul s'a făcut prin arc, fie acest arc oricât de scurt, chiar atunci când defectul are loc într'un cablu, într'o mufă sau, în general, într'un izolant oarecare.

Arcul odată produs, curentul care îl traversează va oscila cu perioada proprie a circuitului respectiv prin care se închide, trecând periodic prin valoarea zero. Se admite că la trecerea prin valoarea zero, curentul nu se restabilește imediat în celălalt sens, ci prezintă o « intermitență ». Aceste intermitențe produc o încărcare a capacităților între faze și între faze și pământ, ceea ce duce la o ridicare generală a potențialului. După explicația dată de P e t e r s e n (3) (1914), aceste încărcări succesive ale capacităților se produc datorită oscilațiilor la frecvențele proprii ale circuitelor, iar conform explicației date de S l e p i a n (4) mai târziu, ele s'ar produce la frecvența forțată a sursei de alimentare în momentul în care curentul trece prin valoarea zero și nu se restabilește imediat. Mulți alți cercetători s'au îndoit de veracitatea acestor explicații, care calitativ sunt identice, observând mai ales că menținerea prelungită a fenomenului nu se explică, deoarece capacitățile odată încărcate în timpul intermitenței se descarcă în momentul stabilirii arcului în rezistențele prezente în circuit. De aceea, S t e i n m e t z a căutat mai târziu explicația în însuși contactul care se formează, adică în arcul la pământ, care ar fi generatorul supratensiunii. Această ultimă explicație a fost primită mult mai puțin favorabil decât celelalte două, deoarece ea nu se verifică experimental, pe când celelalte două explicații (Petersen, Slepian) au fost oarecum verificate pe vremea aceea pe un model redus de curent continuu. Trecerea curentului prin valoarea zero se făcea cu ajutorul unui întrerupător special. Notăm însă că schema realizată nu era de fapt o schemă echivalentă riguroasă, experiența arătând numai un fenomen de acumulare a energiei în condensator, în mod succesiv, provocat de deplasări bruște ale potențialului la bornele condensatorilor, urmate de întreruperi succesive, în timpul cărora încărcarea condensatorilor se păstra. Nu insistăm mai mult asupra acestor explicații, studiate detaliat în anul 1950 de Institutul de Energetică din București. Conchidem numai că, nici din punct de vedere teoretic, nici experimental, nu există o dovadă pozitivă a explicației fenomenului de supratensiune prin arc intermitent acceptat în prezent. Faptele cele mai concludente care măresc îndoiala asupra acestor explicațiii sunt însă diversele constatări făcute între timp, în diverse exploatări care au rețele cu neutrul izolat și anume:

a) Cum se poate explica că unele rețele produc acest fenomen grav și altele nu, cu toate că mărimea capacităților nu poate justifica acest lucru. Cum se explică că la unele rețele cu capacități mari, fenomenul nu a fost observat întotdeuna, iar la altele cu capacități mai mici decât la primele el a fost observat? Este adevărat că fenomenul are loc numai dela o anumită valoare a capacității în sus, dar nu are

loc absolut în toate cazurile. Faptul că el are loc atunci când capacitatea este mare s'a explicat pe baza considerației că arcul trebue să se poată menține stabil și deci să fie hrănit cu un minim de curent capacitiv. Dar atunci dece nu se produce fenomenul întotdeauna când acest minim de curent există?

b) Cum se explică faptul că în aceeași rețea câteodată fenomenul se întâmplă, iar alteori nu. Explicația ar putea fi dată aici prin considerația că atunci când fenomenul nu s'a produs nu a fost arc, ci un contact direct. Este imposibil de dovedit când a fost și când nu a fost arc și tocmai această împrejurare est după părerea noastră, cauza pentru care a rezistat explicația veche a arcului intermitent și ea este acceptată și astăzi. In orice caz nu se poate dovedi că a fost arc, atunci când contactul a avut loc într'un izolant oarecare și e greu de explicat dece un asemenea contact nu produce sau produce perturbații în aceeași rețea.

c) Din observațiile noastre, anumite rețele au prezentat acest fenomen într'un anumit interval de timp, apoi cu toate că rețeaua nu a fost micșorată, ci a fost chiar extinsă — fenomenul a dispărut (sectoare ale rețelei de 6 kV din București).

Nu se poate presupune, în cazul în care fenomenul a dispărut la aceeași rețea, că nu a mai apărut niciodată arc, în cazul unui defect la pământ așa cum apărea înainte și lucrurile rămân inexplicabile.

Acest fapt apare cu atât mai curios cu cât în cazurile observate de noi, curentul capacitiv al rețelei a crescut (nu a scăzut între timp), ceea ce ar trebui să favorizeze menținerea arcului și fenomenul să devină mai frecvent și mai puternic (capacități mai mari). El însă a dispărut complet.

d) La câteva verificări experimentale făcute în trecut pe rețelele reale de înaltă tensiune și anume pe linii lungi aeriene, nu s'a observat la oscilograf oscilațiile curentului cu intermitențele ce ar rezulta din explicația clasică a arcului intermitent.

Curentul ce traversa defectul la încercările pe viu care s'au făcut în trecut, avea frecvența forțată a rețelei și câteodată unele armonici. S'a observat o componentă continuă, care se amortizează, fapt ușor explicabil pentru partea inițială a fenomenului.

★

Având în vedere importanța capitală a acestui fenomen asupra tratării neutrului și a izolației rețelelor, credem că este necesară astăzi o revizuire a concepției bazată pe cercetări vechi pentru a lămuri complet cauzele acestui fenomen.

Explicarea cauzelor acestui fenomen ar putea contribui la curmarea discuțiilor care mai există în lumea tehnică în legătură cu diversele tipuri de rețele, din punct de vedere al tratării neutrului.

Exploatările, având în vedere explicația clasică a arcului intermitent, atribue drept cauză a oricărui fenomen de supratensiune internă, care se manifestă prin defecte simultane în mai multe puncte ale rețelei, un arc inițial la pământ presupus «intermitent» la locul primului defect fără a mai căuta altă explicație. Acest sistem de a judeca este astăzi generalizat. De altfel, toate tratatele de specialitate fără excepție atribue tot arcului din locul defectului explicația supratensiunii prelungite, a rețelelor cu neutru izolat (din lipsa unei alte explicații).

Având în vedere că acest fenomen are un aspect de durată, am încercat în studiul de față, să cercetăm din nou cauzele care ar putea interveni cu un caracter mai permanent și care ar putea fi conținute structural în anumite rețele. Reamintim că suprate siunea datorită comutației, dacă nu este însoțită de alte fenomene, nu este în general periculoasă, ea dând o solicitare scurtă în timp, pentru care materialul rețelelor este în general suficient de rezistent. Numai caracterul de durată,

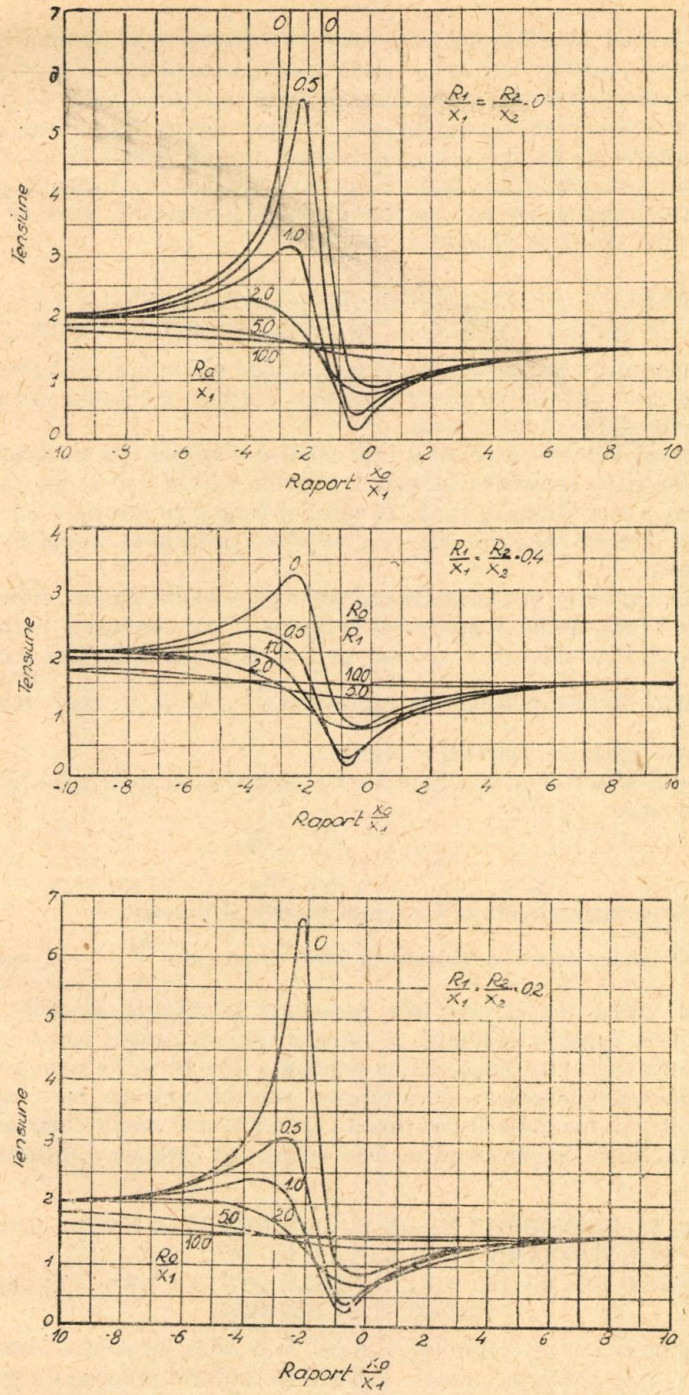

Fig. 1. — Tensiunea fazei *b* în cazul scurtcircuitului la pământ pe faza *a*, în unităţi din tensiunea nominală pe fază.

care trebue căutat în existența unei surse cu caracter mai permanent, iar nu în descărcarea unei cantități limitate de electricitate, conținută într'un anumit circuit, poate să provoace deteriorări grave chiar în cazul supratensiunilor nu prea ridicate. Faptul că această supratensiune durează un timp relativ lung (incomparabil mai lung decât ordinea de mărime a constantelor de timp a circuitelor) și faptul că are o întindere mare în spațiu în rețeaua respectivă, ne face să căutăm în primul rând cauza în jurul fenomenelor cu caracter oarecum permanent, care ar putea avea loc în cazul unui defect la pământ al unei faze.

II. ANALIZA FENOMENULUI DE SCURTCIRCUIT LA PĂMÂNT ÎNTR'O REȚEA OARECARE, AȘA CUM SE FACE ÎN PREZENT

Calculul curenților de scurtcircuit se face în mod obișnuit considerându-se numai reactanțele și deci cu neglijarea capacităților. In plus, reactanța inversă se consideră în general egală cu cea directă.

Se calculează valoarea intensității, în momentul inițial, cu reactanța de scăpări a generatorilor și cu tensiunea în spatele acestei rectanțe și se aplică apoi curbe tip de variație a curentului în timp. In ultimul timp s'au întocmit curbe gata calculate, pentru diverse rapoarte ale reactanțelor, ținându-se seama și de rezistențele circuitelor.

S'a precalculat astfel și tensiunile care apar pe celelalte faze în momentul scurtcircuitului pe o fază. Astfel, reproducem în figura 1, trei asemenea curbe precalculate, care arată tensiunile care se nasc pe faza b atunci când faza a este pusă la pământ, pentru diverse mărimi ale raportului $\frac{x_0}{x_1}$, adică a valorii reactanței homopolare către valoarea reactanței directe.

Valorile din abace sunt calculate cu rectanțele de scăpări (pentru generatori) și cu aproximația

$$x_1 = x_2 ; \frac{R_1}{x_1} = \frac{R_2}{x_2}$$

adică identitatea între circuitele secvenței directe și inverse.

Din aceste abace apare o valoare în jurul raportului $\frac{x_0}{x_1} = -2$ care duce la supratensiuni. Acest raport este însă nerealizat în rețelele electrice. Faptul că acest raport este negativ înseamnă că rețeaua este cu neutru izolat (x_0 negativ). Intr'o asemenea rețea este imposibil ca reactanța directă să fie numai de două ori mai mică decât cea homopolară, dacă rețeaua este sub tensiune, reactanța homopolară fiind mult mai mare decât cea directă (puterile mai mici) chiar dacă rețeaua este în gol. De aceea se consideră în mod curent, că asemenea fenomene nu sunt posibile.

III. ANALIZA FENOMENULUI DE SCURTCIRCUIT A UNUI GENERATOR FUNCȚIONÂND PE O REȚEA ÎN GOL (CAPACITIVĂ) ȚINÂND SEAMA DE DIFERENȚELE DINTRE REACTANȚELE DIRECTE ȘI INVERSE

Să presupunem un generator legat direct la o rețea cu neutru izolat, funcționând în gol și care absoarbe o putere capacitivă conform schemei de principiu din figura 2, a. Să căutăm în primul rând posibilitățile rezonanței în cazul în care o fază se pune la pământ în punctul A, ținând seama de diferențele care există între reactanța directă și cea inversă la generator.

Lucrăm în unități relative și luăm ca putere de bază puterea capacitivă a rețelei. Notăm cu minus capacitățile ce intervin în schemă pentru a căpăta formule în care, toate mărimile sunt pozitive. Neglijăm rezistențele circuitelor.

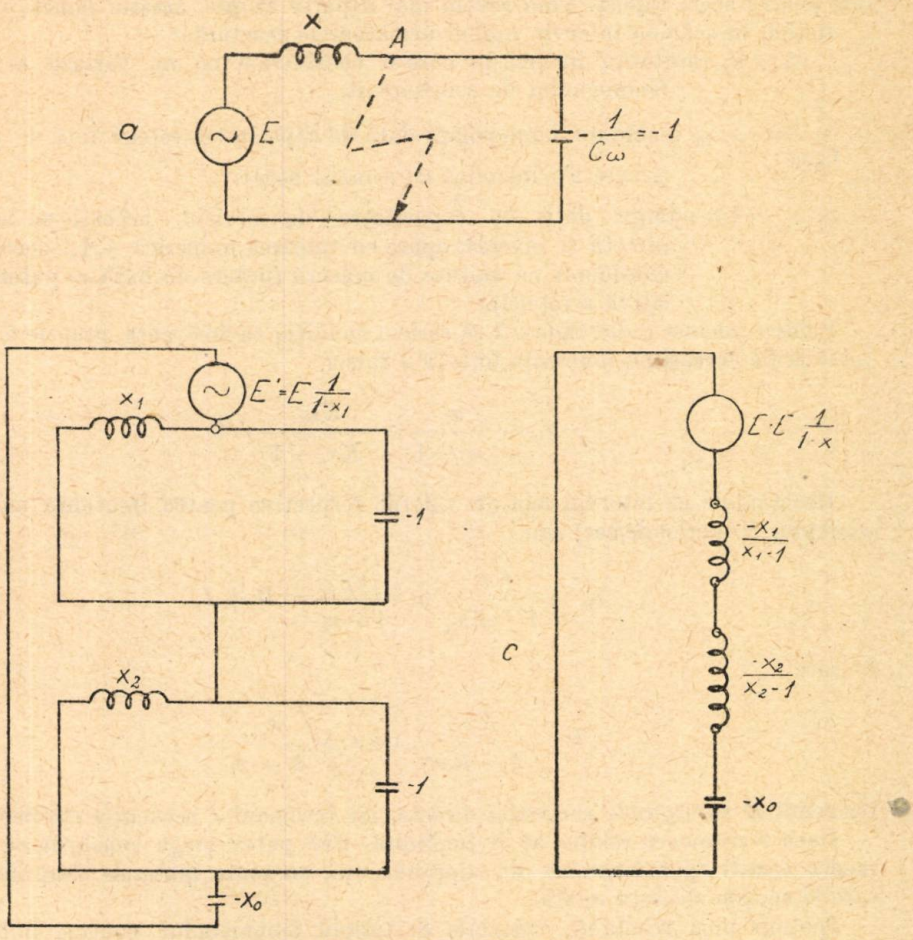

Fig. 2. — *a*. Schema de principiu. *b* și *c*. Schema echivalentă cu scurtcircuitul pe faze *a* în punctul *A* pentru cele 3 rețele secvente.

In secvența directă scoatem forța electromotoare E, afară. Ea se înlocuește deci, dacă se ține seama de cele de mai sus, cu

$$E' = E\frac{1}{1 - x_1}$$

Notăm cu

$x_1 = Kx_i$ reactanța directă

$x_2 = x_i$ reactanța inversă.

Coeficientul K este raportul $\frac{x_1}{x_2}$ care știm că poate fi considerat variabil în timpul fenomenului de scurtcircuit și se cunosc limitele practice ce pot fi considerate pentru acest raport. Vom reveni mai departe asupra acestui punct.

Astfel, în schemă intervin numai următoarele reactanțe:

$x_i = x_2$ reactanța inversă pe care o considerăm că nu variază în timpul fenomenului de scurtcircuit.

$-\frac{1}{C_0\omega} = -x_0$ reactanța homopolară dată de capacitatea rețelei față de pământ și care s'a introdus cu semnul negativ.

$-x_c = -1$ reactanța dată de capacitatea de serviciu, aceeași pe secvența directă și inversă, apare cu valoarea numerică -1, deoarece s'a considerat ca unitate de măsură (putere de bază = putere capacitivă a rețelei).

Pentru schema *c* din figura 2 să scriem condiția ca frecvența proprie a circuitului să fie aceeași cu frecvența forțată a sursei

$$-x_0 - \frac{x_i}{x_i - 1} - \frac{Kx_i}{Kx_i - 1} = 0$$

Reactanțele ce intervin aici au valorile respective pentru frecvența sursei (de exemplu, 50 perioade/sec) sau

$$x_0 = \frac{Kx_i}{1 - Kx_i} + \frac{x_i}{1 - x_i} = D + I,$$

în care

$$D = \frac{Kx_i}{1 - Kx_i}, \text{ iar } I = \frac{x_i}{1 - x_i},$$

termenul D corespunde secvenței directe, iar termenul I secvenței inverse.

Dacă o asemenea relație ar fi împlinită, s'ar putea trage concluzia că în asemenea cazuri apar fenomene de supratensiuni, cu toate ipotezele simplificate pe care le conține această relație.

Ipoteza unei reactanțe variabile în timpul fenomenului conține implicit și ipoteza unei tensiuni în spatele acestei reactanțe, tensiune care variază la rândul ei. Se știe însă că în primul moment, se pot evalua curenții de scurtcircuit în ipoteza că tensiunea în spatele reactanței de scăpări nu a variat, iar la stabilirea regimului permanent se pot determina mărimile din considerarea reactanței de regim permanent și a tensiunii respective. Stările intermediare între punctul inițial și cel final pot fi considerate ca o trecere printr'o reactanță variabilă și o tensiune variabilă, în spatele acestei reactanțe, în determinarea simplificată a fenomenului, iar coeficientul K de mai sus, variabil în timp, stabilește mărimea reactanței variabile în fiecare moment.

Vom studia pe rând variația posibilă a fiecăruia din termenii D și I definiți mai sus, care adunați dau valoarea x_0, necesară pentru rezonanță.

Pentru aceasta să considerăm că generatorul are o putere nominală mai mare decât puterea capacitivă a rețelei $P_g > 1$, ceea ce este întotdeauna adevărat în realitate, dacă rețeaua este în gol.

Considerăm că generatorul are următoarele reactanțe în unități relative (care corespund ca valori mijlocii cu ale turboalternatorilor), raportate la puterea nominală a generatorului

$$x_i = 0{,}3$$
$$x'_d = 0{,}15$$
$$x_s = 1{,}8$$

x_i = reactanța inversă
x'_d = reactanța de scăpări
x_s = reactanța sincronă

Dacă generatorul ar avea o putere egală cu 1 (puterea capacitivă a rețelei), atunci reactanța lui inversă ar avea valoarea $x_i = 0{,}3$, iar dacă are putere nominală mai mare $x_i < 0{,}3$.

Deci limitele reale ale lui x_i trebue căutate între 0 și 0,3 plecând dela premiza că puterea generatorului ce funcționează pe o rețea în gol este mai mare decât puterea capacitivă a rețelei.

Pe de altă parte nu sunt reale decât soluțiile în care termenului $I = \frac{x_i}{1 - x_i}$, care este cuprins între 0 și 0,428 pentru aceste limite ale lui x_i (0 până la 0,3) i se adaugă ceva pentru a da o valoare mai mare ca 1 (cel puțin 0,572), 1 fiind cea mai mică valoare pe care o poate lua x_0 în rețelele reale, în unitățile relative considerate aici.

Aceasta înseamnă că termenul $D = \frac{Kx_i}{1 - Kx_i}$ poate varia numai între 0,572 și $+\infty$, această ultimă valoare pentru $Kx_i = 1$ sau $x_i = \frac{1}{K}$ și nu poate fi niciodată mai mic ca 0,572.

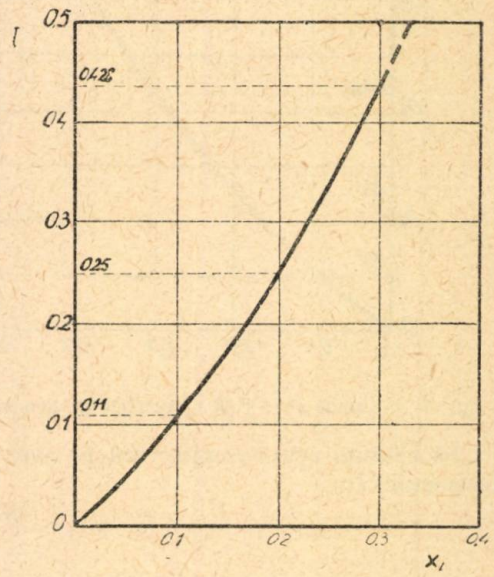

Fig. 3. — Curba $I = f(x_i)$ pentru un generator cu o putere P variind între 1 și ∞.

Raportul K poate varia pentru turboalternatorul cu caracteristici mijlocii ales între 0,5 și 6; 0,5 corespunzând reactanței de scăpări (0,15), iar 6 reactanței sincrone (1,8). După cum am amintit mai sus, în momentul inițial al fenomenului de scurtcircuit, în schimbul de energii reactive se poate considera că intervine numai reactanța de scăpări a generatorului ($K = \frac{x_i}{x_d} = \frac{0{,}15}{0{,}3} = 0{,}5$), iar la sfârșitul fenomenului, în regim staționar, o reactanță mult mai mare, care la limită poate atinge reactanța sincronă cu valoarea ei maximă ($K = \frac{1{,}8}{0{,}3} = 6$), valoarea ei depinzând de impedanța externă și starea de excitație a generatorului.

Să vedem deci ce devin termenii I și D, corespunzând secvenței inverse și directe pentru aceste valori ale lui K.

Vom studia atât termenul D cât și termenul I, numai în intervalul real $x_1 = 0$, $x_i = 0{,}3$ (fig. 3 și 4).

Se vede de pe curba din figura 3 că componenta în valoarea lui x_0 dată de reactanța inversă este cuprinsă între 0 și 0,428 pentru un generator de putere $P = \infty$, adică $x_i = 0$ până la $P = 1$, adică $x_i = 0{,}3$.

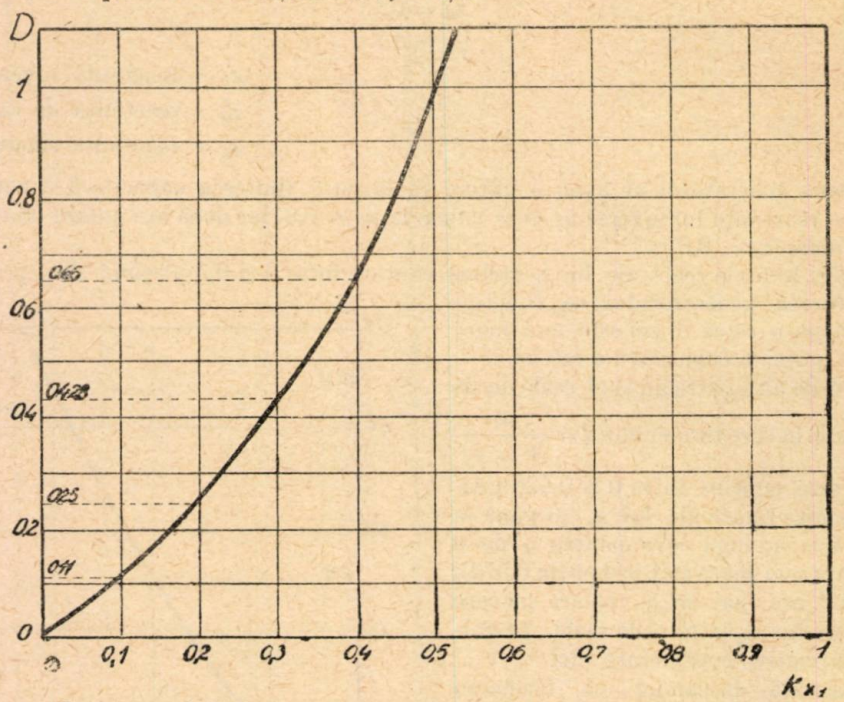

Fig. 4. — Curba $D = f(Kx_i)$ pentru un generator cu o putere P variind între 1 și $+\infty$.

Să căutăm acum componenta pe care o dă reactanța directă, adică variația termenului D

$$D = \frac{Kx_i}{1 - Kx_i}.$$

După cum am văzut se elimină toate valorile negative ale termenului D, deoarece $D + I = x_0$, x_0 este întotdeauna pozitiv și mai mare ca 1. Într'adevăr, deoarece reactanța corespunzătoare capacității de serviciu s'a notat în unități relative cu -1, reactanța corespunzătoare capacității homopolare $(-x_0)$ va fi la rândul ei întotdeauna mai mare în valoare absolută ca 1 (iar x_0 va fi pozitiv).

Conform celor spuse mai sus, ne oprim pentru Kx_i la valoarea maximă egală cu 1, deoarece valorile mai mari ca 1 ar duce la valori negative, care după cum am văzut nu sunt posibile (numitorul termenului D devine negativ, pe când cel real nu poate fi cuprins decât între 0,572 și $+\infty$; discuția asupra termenului I de mai sus).

Valorile curbelor din figurile 3 și 4 adunate pentru aceeași valoare a lui x_i ne dau valoarea absolută a lui x_0, adică a reactanței homopolare corespunzătoare capacității la pământ $(-x_0)$, valoare corespunzătoare condiției de rezonanță.

x_0 este întotdeauna mai mare ca unitatea — după cum am văzut mai sus. Din această considerație și din examinarea curbelor din figurile 3 și 4 se poate deduce

că pentru orice valoare a lui x_0 egalitatea care dă condiția de rezonanță este satisfăcută la un moment dat dacă

$$0{,}167 < x_i < 0{,}3.$$

Valorile respective ale lui x_0 se obțin dacă se adună ordonatele curbelor din figurile 3 și 4, ceea ce duce la curba din figura 5, dedusă pentru valori ale lui x_i cuprinse în limitele de mai sus (dând toate valorile posibile lui K între 0,5 și 6).

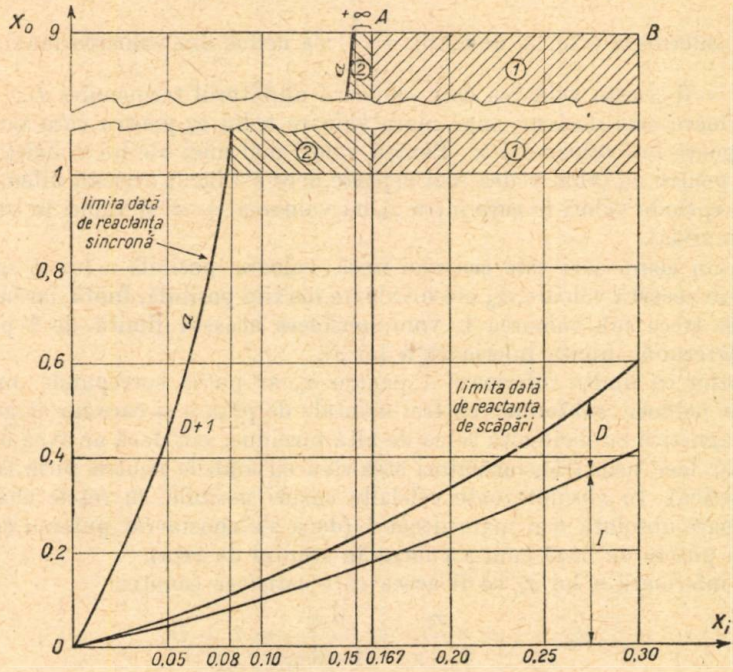

Fig. 5.— Graficul ce dă valorile posibile ale lui x_0 pentru x_i cuprins între 0,08 și 0,3.

Intr'adevăr (v. pe curbe) pentru
$x_i = 0{,}167 \ldots\ldots$ $Kx_i = 0{,}0835$ până la 1, iar termenul D trece dela 0,1 la $+\infty$ în timpul variației lui K. Deci $D + I = x_0$ la un moment dat, dacă $x_0 > 1$.

Pentru
$x_i = 0{,}3; \ldots\ldots$ $Kx_i = 0{,}15$ până la 1, iar termenul D trece dela 0,176 la $+\infty$; la fel $D + I = x_0$ oricare ar fi x_0 mai mare ca 1. Pentru x_i cu valori între limitele 0,167 și 0,3, Kx_i are limita inferioară cuprinsă între 0,0835 și 0,15 și cea superioară tot 1, lucrurile petrecându-se la fel ca mai sus, termenul D variind cu limita inferioară între 0,09—0,176 (pentru $K = 0{,}5$ și până la $+\infty$ pentru $Kx_i = 1$).

In figura 5 s'a determinat zona în care se poate găsi x_0 pentru a fi împlinită condiția de rezonanță dată de relația (1) în cazul când K este variabil și cuprins între 0,5 și 6.

Din acest grafic se vede că de fapt oricare ar fi valoarea lui x_0, dacă ea este mai mare ca 1 se trece întotdeauna printr'un punct de rezonanță dacă x_i este cuprins între 0,3 și 0,167.

Dacă revenim acum la puterea reală a generatorului, limitele puterii nominale a acestui generator (P_g) ar fi cuprinse între

$$P_c < P_g < P_c \frac{0,3}{0,167} \; ; \; P_c < P_g < 1,8\, P_c$$

P_c = puterea capacitivă a rețelei notată mai sus, în unități relative cu 1.

Deoarece x_0 se găsește întotdeauna în această zonă, se poate afirma că în asemenea cazuri condiția de rezonanță este întotdeauna împlinită în timpul variației lui K.

Limita inferioară a lui x_i de $0,167 = \frac{1}{6}$ s'a dedus din valoarea maximă a termenului $K = 6$ și este valoarea care anulează numitorul termenului D; $(1 - Kx_i)$. Această valoare este deci cea mai mare valoare a lui x_i pentru care termenul D și deci x_0 poate lua valoarea $+\infty$. Pentru valori mai mici ale lui x_i există o limită superioară pentru x_0 (vom vedea mai departe dece s'a făcut această diferență între zona care cuprinde valori în care intră x_0 cu valoarea $+\infty$ și valori în care x_0 are o limită maximă).

Să căutăm acum care este cea mai mică valoare posibilă a lui x_i sub 0,167. Deoarece sub această valoare, x_0 are o valoare maxim posibilă, finită, iar în realitate x_0 nu poate trece sub valoarea 1, vom considera această limită de 1 pentru x_0, pentru a determina limita inferioară a lui x_i.

Reamintim că limita inferioară 1 pentru x_0 ar putea corespunde unei rețele trifazate de cabluri subterane, cu trei mantale de plumb și care nu ar avea nicio legătură magnetică cu nicio altă rețea de altă tensiune, sau dacă ar avea-o, această legătură s'ar face prin transformatori stea-stea cu ambele neutre puse la pământ (nu se practică). In absolut toate celelalte cazuri posibile, în rețele electrice, x_0 este în valoare absolută mai mare decât 1 (dacă s'a considerat puterea capacitivă a rețelei ca putere de bază cum s'a făcut în studiul de față).

Limita inferioară a lui x_i va fi aceea care satisface ecuația

$$x_0 = 1 = \frac{x_i}{1 - x_i} + \frac{6\, x_i}{1 - 6\, x_i} = I + D,$$

K luând aici valoarea cea mai mare posibilă 6 care corespunde reactanței sincrone. Ecuația de mai sus este satisfăcută pentru $x_i = 0,08$ și $x_i = 0,7$. Din aceste două valori ne interesează numai $x_i = 0,08$ care este limita inferioară a reactanței x_i pentru care valoarea lui x_0 se găsește încă deasupra limitei stabilite.

Astfel găsim a doua zonă în care este din nou posibil fenomenul de rezonanță, de rândul acesta condiționat neapărat de valoarea capacității la pământ a rețelei și care corespunde lui

$$x_i = 0,08 - 0,167$$

sau dacă revenim la puteri, puterea corespunzătoare a generatorului față de puterea capacitivă a rețelei ar avea următoarele limite.

$P_g = 1,8\, P_c$ (pentru $x_i = 0,167$) până la $P_c \frac{0,3}{0,08}$ (pentru $x_i = 0,08$) deci până la $3,75\, P_c$.

In a doua zonă x_0 are o limită maximă care atinge $+\infty$ pentru puterea $1,8\, P_c$ și se coboară la 1 pentru $3,75\, P_c$ (zona 2, figura 4). Și în această a doua zonă, oriunde s'ar găsi x_0 în cuprinsul ei se trece printr'un punct de rezonanță pentru valori ale lui x_i cuprinse între 0,167 ($1,8\, P_c$) și valoarea lui x_i la intersecția dreptei lui x_0

cu curba *a* de pe figură, ce limitează zona când variază K între limitele fixate, raționamentul fiind identic cu cel pentru prima zonă. Curba *a* corespunde lui K maxim, adică reactanței sincrone.

Observăm că în a doua zonă ne apropriem de valorile reale, pe care le pot avea generatorii în rețele cu capacități de serviciu mari, funcționând în gol. Mai observăm că în această zonă influența termenului I este neglijabilă (secvența inversă), pe când în zona 1, în unele cazuri poate avea oarecare importanță (în orice caz mult mai mică decât a secvenței directe). Mai observăm că în zonă 2, valorile cele mai mici pentru x_i (și deci cele mai mari corespunzătoare pentru P_g) sunt date pentru K apropiat de 6, adică *pentru reactanțe apropiate de reactanța sincronă.*

Din această primă examinare, pe care o socotim deocamdată numai de orientare, deducem următoarele concluzii și observații de ordin general.

— In momentul unui scurtcircuit la pământ, se introduce o putere capacitivă în plus în circuitele generatorului, care poate avea importanță în unele împrejurări.

— Dacă această putere este suficient de mare ne putem apropria de condiția de rezonanță în regimul permanent ce se stabilește către sfârșitul fenomenului. Observăm că dacă $x_0 = \infty$ (puterea capacitivă homopolară mică), punctele care satisfăceau condiția de rezonanță din zona 1 nu pot fi reale, deoarece ele se află și pe secvența directă care e singura ce conduce la valoarea $+\infty$ (termenul D de mai sus), iar *generatorul respectiv nu ar fi putut funcționa înainte de defect, căci rezonanța era împlinită.*

— Cu cât puterea capacitivă homopolară e mai mare, cu atât posibilitățile fenomenului cresc, deoarece se măresc limitele puterii nominale ale generatorului.

— Condiții reale în rețelele electrice apropiate de cele de mai sus trebue căutate acolo unde capacitățile ce intervin (între faze + între faze și pământ) au o mărime a puterii apropiată sau ceva mai mică ca puterea generatorilor și în orele când aceste rețele consumă energie reactivă puțină (în gol).

— Același fenomen pare posibil pentru generatori mult mai puternici, dacă se consideră frecvențe mai mari ca frecvența de serviciu. Intr'adevăr, în acest caz, x_i crește cu raportul frecvențelor, pe când $-x_0$ și $-x_c$ (reactanța corespunzătoare capacității de serviciu și celei homopolare) scad ca valoare absolută în același raport. O examinare pe aceeași cale ca mai sus conduce la concluzia că generatorii în acest caz pot fi de puteri mult mai mari. Este de observat că în acest caz, K nu mai are variația de mai sus. Se știe de asemenea că asemenea fenomene de rezonanță la frecvențe mari nu sunt periculoase decât până la frecvența de cca 150 (armonica 3), dincolo de aceasta intervenind amortizări rapide din cauza mărimii pierderilor. Evident că asemenea fenomene la frecvențe înalte pot avea loc în unele cazuri, dar ele nu pot constitui cauza fenomenului pe care îl căutăm, căci nu ar putea fi prezente în toate rețelele de înaltă tensiune (peste 60 kV) mai întinse după cum s'a constatat în istoricul desvoltării rețelelor.

— In evaluările de mai sus s'a considerat că rezonanța ar putea avea loc, pentru orice valoare a reactanței cuprinse între reactanța de scăpări și reactanța sincronă. O oarecare asemănare cu fenomenele de ferorezonanță pare să justifice un asemenea punct de vedere. Fenomenul arătat în generator este mult mai complex și literatura tehnică este în general săracă în studii pentru acest caz. Ceea ce se poate afirma este însă, că rezonanța are loc cu reactanțele interne echivalente ale generatorului, acest lucru fiind constatat chiar în exploatări.

In plus, situațiile periculoase par a fi acelea care rezultă când se consideră reactanțe mari, apropiate de cele de regim permanent. Mai departe vom cerceta în detaliu numai aceste situații.

— O altă constatare este că secvența inversă contribue foarte puțin, atunci când se consideră reactanța sincronă și influența ei ar fi neglijată în multe cazuri în care reactanța ce intervine în calcul se apropie de cea sincronă (fig. 5 — limita dată de reactanța sincronă în zona 1 și componenta I pe care o conține).

— In analiza făcută mai sus și având ca scop unic o determinare de ordine de mărime, s'a considerat un generator cu anumite reactanțe mijlocii, legat direct la rețea. S'a constatat că pentru zona în care sunt ordine de mărimi ce se pot apropria de cele ce se întâlnesc real, termenul I al reactanței inverse este neglijabil, iar reactanța periculoasă pare a fi cea sincronă de regim permanent. Astfel, dacă la un generator considrăm $x_s = 200\%$ (reactanța sincronă), aceeași expresie (1) se mai poate scrie în funcție de P_0 (puterea capacitivă homopolară) și P_n (puterea nominală a generatorului) cu neglijarea reactanței inverse

$$\frac{1}{P_0} = \frac{\frac{2}{P_g}}{1 - \frac{2}{P_g}} = \frac{2}{P_g - 2}$$

De unde

$$P_g = 2\,P_0 + 2 \quad \text{(în unități relative)}$$

sau

$P_g = 2\,(P_0 + P_c)$ adică puterea nominală a generatorului egală cu de două ori puterea totală capacitivă ce intervine.

In acest caz, cifra 2 este în unități relative, iar reactanța alternatorului și expresia s'ar mai putea scrie

$$P_g = x_s\,(P_0 + P_c),$$

în care

x_s se exprimă în unități relative la puterea P_g — (în cazul de mai sus = 2).

Această expresie simplă este interesantă ca orientare. Ea dă o indicație asupra *puterii maxime nominale a unui generator legat la o rețea în gol, care ar împlini condiția de rezonanță în caz de scurtcircuit la pământ.* Chiar în cazul unei puteri mai mici ca această putere plafon se împlinește condiția de rezonanță, dacă se consideră reactanța cuprinsă între reactanța sincronă (x_s) și cea de scăpări (variația lui K de mai sus).

Astfel, o condiție generală ar putea fi exprimată prin

$$\frac{x_g}{K}\,(P_0 + P_c) \leqslant P_g \leqslant x_g\,(P_0 + P_c)$$

K cu valoarea maximă în definiția de mai sus, *arată că există o limită superioară a puterii generatorilor, peste care rezonanța în plin nu ar mai fi posibilă.*

In concluzie deci, se poate afirma că părerea generală bazată pe calcule aproximative cu reactanțele de scăpări, că fenomenele de rezonanță nu sunt în general posibile la parametri rețelelor reale (punctul II) în caz de scurtcircuit la pământ, este falsă. Apropieri de condiția de rezonanță, la frecvența normală a rețelei sunt posibile pe reactanțele de regim permanent ale generatorilor și aceste apropieri pot duce la supratensiuni după cum vom vedea mai jos.

Continuarea calculului pe schema echivalentă de mai sus nu se mai poate face pentru o rețea în sarcină, deoarece nu se poate ține seama de reacțiile sarcinii în momentul punerii la pământ. Intr'adevăr, deoarece se caută acum un fenomen dat de regimul permanent, după scurgerea părții tranzitorii, este necesar să se introducă și caracteristicele statice ale sarcinii $P = f(U)$ și $Q = f(U)$. Pe o asemenea schemă acest lucru nu se poate face pentru puterea activă.

Se știe că pentru deplasări mici ale tensiunii se poate considera ca apropiat de realitate o lege de variație dată de relațiile $Q = KU^2$, iar $P = ct.$ In cazul unei puneri la pământ pe o linie oarecare într 'un punct oarecare, e normal să luăm aceste legi de variație ca cele mai apropiate de realitate, considerând că puterile

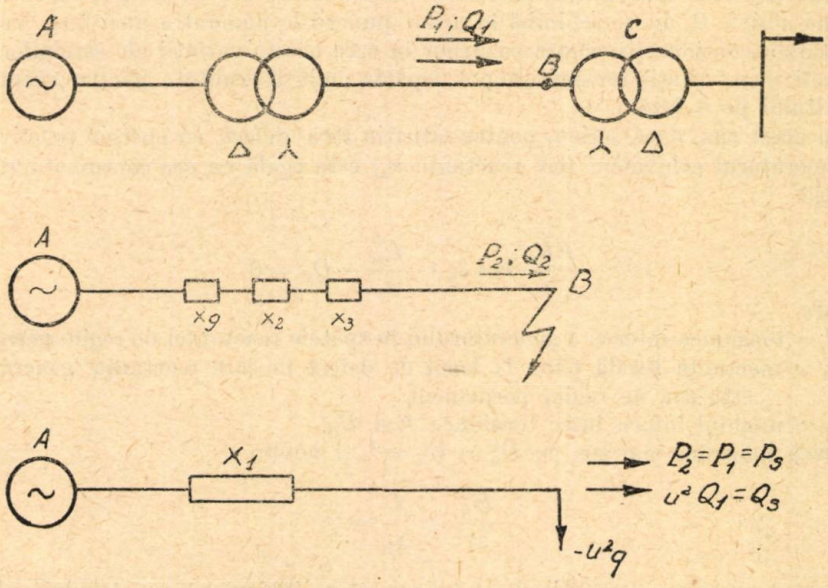

Fig. 6. — Schema redusă la generatorul echivalent A cu reactanța x_1 ($x_g + x_2 + x_3 \ldots$) ce debitează în punctul B o energie activă P_s și reactivă Q_s.

active au o variație neglijabilă la modificări mici ale tensiunii, deoarece regulatoarele de putere ale mașinilor nu intervin, iar cele reactive variază cu pătratul tensiunii. Vom vedea că deplasările mici de tensiune pe secvența directă în punctul de defect, ce sunt necesare pentru a face să apară fenomenul, justifică aceste premize.

IV. GENERATOR FUNCȚIONÂND ÎN SARCINĂ PE O REȚEA OARECARE CU DEFECT LA PĂMÂNT

Am văzut, din calculele de orientare făcute mai sus, că în anumite situații pentru rețelele în gol, sunt posibile apropieri de rezonanță, în circuitul ce se formează în momentul punerii la pământ a unei faze. Am mai văzut că fenomenul pare posibil pentru reactanțe ale alternatorului, apropiate de reactanța sincronă (mari) și nu este posibil pentru reactanțe apropiate de cele de scăpări (punctul II).

Să reexaminăm acum același fenomen cu rețeaua în sarcină pe baza schimbului de puteri active și reactive între alternator și restul rețelei. Să considerăm o sursă de energie legată printr'o linie la un post coborîtor (fig. 6).

In punctul B se produce un scurtcircuit la pământ pe linia $A-C$ ce leagă cele două posturi de transformare, ambele cu neutrul transformatorilor, izolat.

Inainte de defect, generatorul A debita în punctul B o putere activă P_s şi o putere reactivă Q_s. Notăm tensiunea normală înainte de punerea la pământ în B, cu $U_n = 1$. După punerea la pământ în B tensiunea din punctul B o notăm cu U pentru secvenţa directă. Ştim că o punere la pământ în punctul B înseamnă într'o reţea izolată introducerea în punctul B a unui şunt capacitiv dat de secvenţa inversă plus cea homopolară, puse în serie. Dacă consumaţia acestui şunt sub tensiunea $U_n = 1$ ar fi ost $-q$, la noua tensiune consumaţia de energie reactivă a şuntului capacitiv devine $-qU^2$. La fel, consumaţia de energie reactivă Q_s devine după schimbarea tensiunii în punctul B, egală cu $Q_s\ U^2$. In sfârşit, considerăm că sarcina activă P_s nu se schimbă în urma punerii la pământ a unei faze. Vom face mai târziu consideraţii asupra cazurilor în care aceste variaţii ale sarcinilor active şi reactive cu variaţia tensiunii se pot depărta mult de realitate pentru cazul scurtcircuitului pe o fază.

In acest caz, dacă scriem pentru situaţia fără defect, că energia reactivă dată de generatorul echivalent (cu reactanţa x_1) este egală cu cea consumată, obţinem ecuaţia

$$\frac{EU_n}{x_1}\cos\delta_1 - \frac{U_n^2}{x_1} - Q_s = 0$$

în care

E = tensiunea internă a generatorului în spatele reactanţei de regim permanent.

x_1 = reactanţa totală până la locul de defect în care reactanţa generatorului este cea de regim permanent.

δ_1 = unghiul intern între tensiunea E şi U_n.

Dacă înlocuim mai sus pe $U_n^2 = U_n = 1$ şi notăm

$$\frac{U_n^2}{x_1} = \frac{1}{x_1} = Q_1$$

(pe care o numim consumaţia de energie reactivă internă a generatorului), obţinem

$$E\,Q_1\cos\delta_1 - Q_1 - Q_s = 0 \tag{1}$$

sau

$$E\cos\delta_1 = 1 + \frac{Q_s}{Q_1},$$

de unde deducem tensiunea internă a generatorului

$$E = \frac{1}{\cos\ \delta_1}\left(1 + \frac{Q_s}{Q_1}\right). \tag{2}$$

Să presupunem că nu se face reglajul excitaţiei în timpul defectului de punere la pământ şi că această tensiune internă rămâne aceeaşi după defect. Scriem din nou ecuaţia de echilibru a puterilor reactive după producerea defectului, sub forma dată mai sus în expresia (1) ţinând seama de faptul că tensiunea nu mai este acum 1, ci U.

$$Q_1 E\ x\ U\ \cos\ \delta_2 - Q_1U^2 - Q_sU^2 + qU^2 = 0. \tag{3}$$

Trebue observat că termenii Q_s, Q_1, q sunt chiar puterile reactive consumate de circuitele respective sub tensiunea normală în punctul de defect $U_n = 1$.

δ_2 este noul unghi între tensiunea E și U.

qU^2 este puterea reactivă capacitivă introdusă în circuitul secvenței directe prin șuntul echivalent ce reprezintă defectul de semn contrar cu U^2Q_1 și U^2Q_s.

Acestea din urmă sunt puterile inductive consumate de generator și rețea, când se aplică tensiunea U în punctul B. Dacă înlocuim cu expresia (2) tensiunea internă E presupusă aceeași fără și cu defect găsim

$$(Q_s + Q_1)\frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} U - (Q_s + Q_1) U^2 + qU^2 = 0.$$

Observăm că $Q_s + Q_1 = Q$ este puterea reactivă totală, inclusiv cea consumată de reactanța proprie a generatorului pe care o notăm cu Q, atunci când aplicăm tensiunea $U_n = 1$ (înainte de defect) în punctul B. Avem deci, dacă eliminăm soluția $U = 0$

$$(Q - q) U - Q\frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} = 0,$$

De unde

$$\left(1 - \frac{q}{Q}\right) U = \frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1}. \tag{4}$$

Ca să aflăm noul unghi pe care îl ia generatorul notat cu δ_2, scriem că puterile active s'au păstrat la fel înainte și după defect, ceea ce duce la relația

$$\frac{1 \; x \; E}{x_1} \sin \delta_1 = \frac{U \; x \; E}{x_1} \sin \delta_2,$$

de unde

$$\sin \delta_2 = \frac{\sin \delta_1}{U} \qquad \cos \delta_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \delta_1}{U^2}}.$$

Obținem înlocuind în expresia (4) și ridicând la pătrat

$$\left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 U^2 = \frac{U^2 - \sin^2 \delta_1}{U^2 \cos^2 \delta_1}$$

sau

$$\left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 \cos^2 \delta_1 \, U^4 - U^2 + \sin^2 \delta_1 = 0$$

ceea ce duce la o valoare pentru U dată de relația

$$U^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4\left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 \sin^2 \delta_1 \cos^2 \delta_1}}{2\left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 \cos^2 \delta_1}.$$

Observăm că $4 \sin^2 \delta_1 \cos^2 \delta_1 = \sin^2 2\delta_1$.
Notăm de asemenea cu K_1 expresia

$$K_1 = 1 - \frac{q}{Q},$$

de unde rezultă

$$U^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\delta_1}}{2 K^2 \cos^2 \delta_1}. \tag{5}$$

Formula (5) este foarte interesantă, deoarece conține numai doi termeni foarte ușor de determinat și anume:

Unghiul δ_1 este unghiul inițial al tensiunii generatorului față de tensiunea în punctul unde s'a produs defectul,

Termenul K este termenul care ar da condiția de rezonanță a circuitelor, discutată la punctul III de mai sus. In adevăr;

$$K_1 = 1 - \frac{q}{Q} = 0.$$

Inseamnă că

$$q = Q$$

sau că puterea reactivă capacitivă (cu tensiunea $U = 1$) este egală cu puterea reactivă inductivă. Analiza făcută la punctul III dă o orientare asupra posibilităților acestui termen în ceea ce privește rezonanța, care ar duce și aici la $U = \infty$ (formula 5, $K_1 = 0$).

Reamintim că termenul Q reprezintă chiar puterea reactivă $\frac{U_n^2}{x}$ în care U_n este tensiunea normală în punctul defectului, iar x reactanța totală pe secvența directă privită din punctul defectului. Se știe că această expresie este *chiar puterea de scurtcircuit trifazat*, în punctul de defect (inductivă), așa cum se determină de obicei cu neglijarea rezistențelor. Este de observat că, deoarece termenul K este cu atât mai mic (supratensiunea mai mare) cu cât Q este mai mic și se apropie de q, trebue căutată valoarea «minimă» de scurtcircuit ce poate interveni în rețeaua respectivă, care va conduce la tensiunea maximă. Aceste valori minime sunt de altfel necesare și pentru reglajul releelor și ele sunt în general cunoscute personalului de exploatare. Recomandăm ca la stabilirea valorii minime de scurtcircuit, având în vedere faptul că generatorii, în asemenea momente, pot fi descărcați (ore cu sarcini mici) să se considere pentru generatori în calcul reactanțe apropiate de cea sincronă maximă ce poate interveni și să nu se considere reglajul excitației. Pentru o primă apreciere se poate lua $Q = P_{sc}$, înțelegând aici prin P_{sc}, puterea minimă de scurtcircuit trifazat permanent posibilă, fără reglaj al excitației în punctul unde s'a produs defectul, exprimată în KVA, așa cum se exprimă obișnuit puterea de rupere a întrerupătorilor (trifazat).

Termenul q dacă se neglijează componenta inversă este egal cu $\frac{U_n^2}{x_h}$ în care x_h este reactanța homopolară a rețelei respective (pe fază) sau dacă se cunoaște

curentul total capacitiv la pământ al rețelei respective, cum se cunoaște de obicei în exploatare, se poate folosi expresia

$$q = \frac{U_n I}{\sqrt{3}}$$

în care I este curentul capacitiv total la pământ (dat de cele 3 faze), iar U_n este tensiunea normală a rețelei ($U_n = \sqrt{3}\ E$) între faze în punctul de defect. Dacă reactanța inversă nu poate fi neglijată, atunci reamintim că q este consumația de energie reactivă a șuntului echivalent, ce s'a introdus în secvența directă și care pentru defect la pământ e reprezentat de reactanța inversă în serie cu cea homopolară (fig. 7).

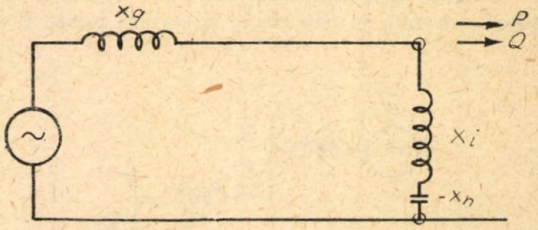

Fig. 7. — Șuntul echivalent în cazul când se consideră și reactanța inversă egală cu $x_i - x_h$.

Dacă până acum

$$q = \frac{U_n^2}{x_h} = q_s$$

în cazul când în serie se adaugă reactanța inversă x_i, consumația de energie reactivă a șuntului devine, cu neglijarea rezistenței

$$q_s = \frac{U_n^2}{x_h - x_i}$$

adică mai mare și nu își poate schimba semnul, deoarece x_i este întotdeauna mai mic ca x_h pentru rețelele electrice.

Reactanța inversă x_i reprezintă un procent din reactanța directă și se poate deduce cu ușurință din examinarea circuitelor în care, cu excepția mașinilor rotative unde $x_i \neq x_d$, pentru tot restul circuitelor până la locul de defect, $x_i = x_d$. Se știe că în calcule de stabilitate pentru rețele complexe, se poate lua $x_i = (0{,}4 \div 0{,}8)\ x_d = p\ x_d$.

Dacă scriem expresia

$$\frac{1}{q_s} = \frac{x_h}{U_n^2} - \frac{p\ x_d}{U_n^2} = \frac{1}{q} - \frac{p}{Q} \text{ (pentru } U_n = 1)$$

obținem raportul

$$\frac{q_s}{Q} = \frac{q}{Q - pq}$$

iar termenul K_1 din formula (5) devine

$$K_1 = 1 - \frac{q}{Q_c - pq} = 1 - \frac{q}{P_{sc} - pq}$$

în care

$$q = \frac{U_n^2}{x_h}$$

este puterea totală reactivă pe secvența homopolară (pe 3 faze), când se aplică acestei secvențe tensiunea simplă în punctul de defect.

p = raportul dintre reactanța inversă și cea directă privite ambele din punctul de defect.

$Q = P_{sc}$ = puterea de scurtcircuit minimă sau puterea reactivă totală ce rezultă când se aplică circuitelor tensiunea U_n în punctul de defect.

x_h = reactanța homopolară a rețelei privită din punctul de defect.

Astfel, toate mărimile din formula (5) au fost lămurite și aduse la cantități cunoscute de obicei într'o rețea sau care se pot deduce cu ușurință.

In privința unghiului δ_1, care intervine în formulă, reamintim că o rețea complexă, cu mai multe uzine și sarcini poate fi adusă la o schemă echivalentă cu un

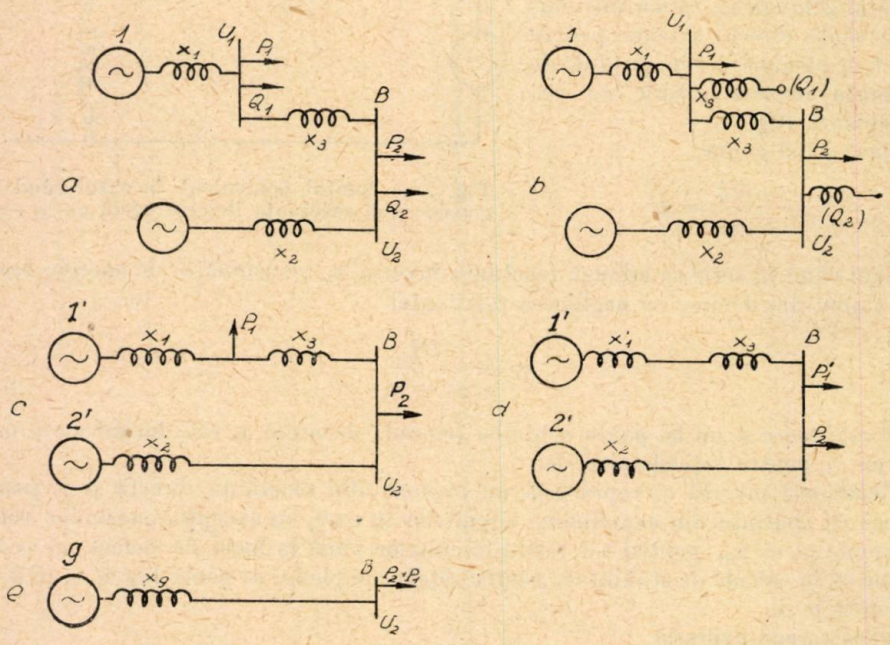

Fig. 8. — Transformările schemei pentru aducerea ei la tipul cu generator unic.

generator unic, care în multe cazuri poate fi aceea pe baza căreia se poate aplica formula de mai sus, generator care debitează în punctul B (unde apare defectul) o putere activă P_s și reactivă Q_s. In cazul când rețeaua poate fi adusă la schema echivalentă cu un singur generator, aprecierea unghiului δ_1 este extrem de simplă (fig. 8).

Pentru reducerea schemei nu menționăm cazurile simple a doi generatori sau două uzine debitând pe o bară sau două bare legate cu reactanțe neglijabile între ele, care se aduc ușor la un generator unic. Luăm cazul general a două centrale 1 și 2 (fig. 8, *a*) cu reactanțele x_1 și x_2 fiecare legate la două bare diferite unde există consumații de energie activă și reactivă P_1, P_2, Q_1, Q_2. Acest caz nu poate fi adus decât prin aproximații la situația echivalentă a generatorului unic, dacă păstrăm caracterul de variație considerat al puterilor consumate cu tensiunea.

In figura 8 schema *b*, s'au notat consumațiile de energie reactivă Q_1 și Q_2 prin două reactanțe echivalente, care au fost apoi introduse în reactanța internă a noilor

generatori 1′ și 2′ din schema *c* din figura 8. In schema *d* (fig, 8) s'a mutat sarcina activă P_1 pe bara B, ceea ce nu se poate face întotdeauna (o să vedem mai departe), și s'a dedus o sarcină echivalentă P_1'. In sfârșit, în schema *e* (fig. 8) prin combinarea reactanțelor $x_1' + x_3$ și x_2' în paralel se obține generatorul unic G. Observăm că pe bara B se putea lăsa consumația de energie reactivă Q_2. Defectul pe bara B este chiar situația pe baza căreia s'a stabilit formula. *Se observă că unghiurile generatorilor nu se schimbă în timpul transformărilor* (dacă sarcinile pot fi mutate la cap), deoarece diversele mărimi ce se transformă (reactanțe interne și tensiuni interne) se înmulțesc la transformare cu diverse rapoarte între reactanțe (dacă se neglijează rezistența circuitelor), care nu rotesc vectorul respectiv. Astfel, tensiunea internă a generatorului 1′ în care s'a introdus sarcina reactivă Q_1 (x_s) este

$$E' = E \frac{x_s}{x_1 + x_s}$$

iar reactanța lui internă este

$$x_1' = \frac{x_s x_1}{x_1 + x_s}.$$

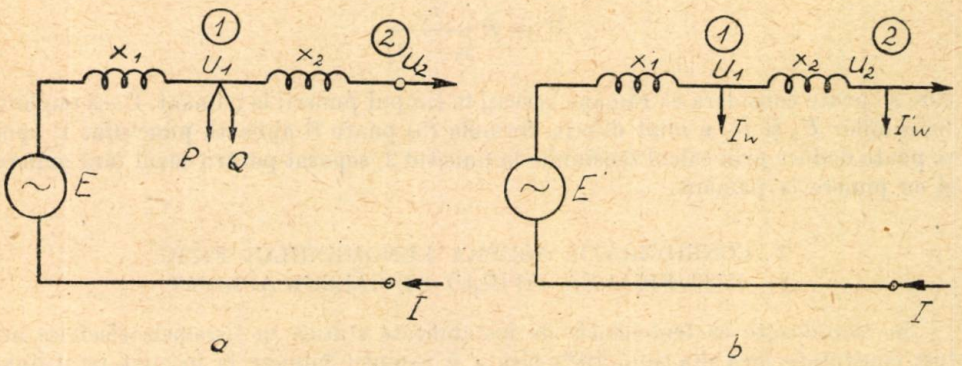

Fig. 9. — Mutarea sarcinii active în punctul de defect.

Unghiul tensiunii E și E' este același. Deci în cazul unei singure uzine, se ia chiar unghiul tensiunii interne al acestei uzine față de locul defectului, fără a mai fi nevoie să se reducă schema pentru sarcini, iar în cazul a mai multe uzine se combină uzinele în una singură și se ia unghiul acestei uzine (tensiunile interne se combină cu unghiurile lor respective).

In ceea ce privește mutarea sarcinii active P în alt punct al schemei lucrurile nu sunt întotdeauna simple. Acest lucru nu poate fi făcut decât dacă unghiul tensiunilor din locul unde se află sarcina P și locul de defect este neglijabil. Să considerăm pe schema din figura 9, mutarea sarcinii din punctul 1 în punctul 2. In primul rând reducem sarcina reactivă Q prin înlocuirea ei cu o reactanță și găsirea unui generator echivalent E' (fig. 9, schema *a* și *b* cu o reactanță x_1')

$$x_1' = \frac{x_q x_i}{x_1 + x_q},$$

în care x_q e reactanța echivalentă sarcinii. Această primă înlocuire este riguros exactă pentru orice situație, deoarece s'a presupus că sarcina reactivă variază cu

pătratul tensiunii. In acest caz, în punctul U_1 rămâne numai un curent I_w (watat), în fază cu tensiunea U_1 care reprezintă sarcina activă P. Acest curent I_w poate fi mutat în punctul U_2 prin introducerea unui curent I'_w astfel ca

$$I'_w = \frac{I_w x'_1}{x'_1 + x'_2}.$$

Indiferent de mărimea și faza curentului I_w, curenții I_w și I'_w au aceeași fază, iar tensiunile U_1 și U_2 nu.

Reamintim că formula (5) s'a stabilit *pe considerația că sarcinile active nu variază la punerea la pământ a unei faze. La transformarea schemei trebue avut în vedere acest lucru.*

In cazul deducerii curentului echivalent I'_w ca mai sus, puterea $P_1 = I_w U_1$ este înlocuită de o altă putere $P'_1 = I'_w U_2$, dar în plus și de o putere reactivă datorită faptului că I'_w nu are aceeași fază ca U_2 (avea aceeași fază cu U_1). Dacă această putere reactivă este neglijabilă și aceasta are loc numai dacă unghiul tensiunilor U_1 și U_2 e foarte apropiat, se poate muta puterea activă din punctul 1 și 2 prin simpla înlocuire a puterii active cu o putere

$$P' = P \frac{x_i}{x_1 + x_2}$$

care se poate considera că rămâne aceeași în timpul punerii la pământ. Dacă unghiul tensiunilor U_1 și U_2 e mult diferit, formula (5) poate fi aplicată punctului 1, apoi se poate deduce prin calcul tensiunile în punctul 2, separat pentru cazul fără punere și cu punere la pământ.

V. CONSIDERAȚII ASUPRA FENOMENULUI FIZIC ȘI JUSTIFICAREA TIPULUI DE CALCUL APLICAT

Se reamintește că fenomenele de instabilitate statică în sistemele electrice au fost constatate încă din anul 1925 fără a fi complet înțelese la început pe o linie de 220 kV din California, care la un moment dat, la o anumită sarcină, producea fenomene de instabilitate, generatorii ieșind afară din circuit. Calculele făcute care au verificat apoi cazurile care s'au întâmplat pe diverse rețele, au introdus noțiunea unei reactanțe interne echivalente a generatorului, de regim permanent mult mai mare decât reactanțele de scăpări ale înfășurărilor. Această reactanță echivalentă, numită și sincronă, are valoarea cea mai mare când generatorii sincroni funcționează cu puteri mici și tensiuni reduse la borne.

Generatorii în regim permanent schimbă deci energia reactivă cu restul rețelei conform valorii corespunzătoare acestei reactanțe interne. La o punere la pământ a unei singure faze, într'o rețea cu neutrul izolat, regimul de funcționare al rețelei nu se găsește modificat, puterile active rămânând practic aceleași, iar la funcționarea mai departe un oarecare timp cu punere la pământ, este nimerit să se considere în schimbul de energii reactive pentru generator, situațiile verificate de stabilitatea statică și dovedite exacte din experiența de până acum. Acest punct de vedere justifică calculul energiei reactive totale (Q), pe baza reactanțelor sincrone și fără reglaj al excitației, deoarece tensiunea la bornele generatorului nu se găsește neapărat modificată în caz de scurtcircuit pe o fază, mai ales dacă rețeaua cu defect are legătură magnetică (nu galvanică) cu generatorii și aceștia din urmă sunt la o oarecare distanță electrică de locul defectului. In plus, reglajul tensiunii disi-

metrice pe cele trei faze, poate fi luat dela un transformator de tensiune așezat pe o fază sau între două faze, unde practic să nu intervină diferențe sensibile de tensiune după defectul la pământ. Este neîndoielnic deci că în cazul scurtcircuitului la pământ, pe o rețea cu neutru izolat, care nu este eliminat imediat de protecție se pot determina variațiile de tensiune pe baza schimbului de energii reactive așa cum intervin în calculele de stabilitate statică, iar ipoteza din care s'a dedus unghiul generatorului și anume că nu intervin variații ale tensiunii din spatele reactanței sincrone pare de asemenea justificată. Numai în cazul stabilirii unei supratensiuni mari, care ar apare pe secvența directă, aproape de generator, ipotezele de mai sus nu mai sunt exacte, rămânând totuși valabile pentru aprecierea calitativă a fenomenului. Să vedem mai în de aproape cum se repartizează tensiunile pe cele trei faze, dela punctul de defect și până la generator.

Să considerăm cazul simplu din figura 10: un generator cu reactanță internă x_g, alimentând printr'o reactanță x un transformator triunghi-stea, cu reactanță x_t, legat la bara cu tensiunea U a unei rețele cu neutru izolat față de pământ. Scurtcircuitul la pământ s'a produs în rețeaua cu neutru izolat pe faza a. In diagramele a și b din figura 10 se văd tensiunile ce se nasc (cu neglijarea tensiunii inverse) în sistemul cu neutru izolat și defect și în sistemul la care e legat generatorul. Tensiunile simple în primul sistem sunt

$$V_a = 0 \quad V_b = 1{,}73\ V_d \text{ și } V_c = 1{,}73\ V_d$$

iar în al doilea

$$V_a = V_b = V_c = V_d\ .$$

Dacă apare și disimetrie datorită componentei inverse care nu e neglijabilă, se produce o disimetrie nouă, care de rândul acesta apare și în rețeaua generatorului. In cazul în care transformatorul ce leagă cele două rețele ar fi fost stea-stea (fig. 10, c) se nasc două tensiuni egale pe fazele C și B și tensiune mai scăzută între fazele B, C.

Când transformatorul e triunghi-stea, tensiunea directă se decalează cu 30° într'un sens, iar cea inversă cu 30° în sens contrar, ceea ce duce la diagrama din figura 10, d.

Se vede că se nasc două tensiuni egale, pe fazele A și C, și una mai mică chiar decât valoarea componentei directe și anume $V_d - V_i$, pe faza B. Dacă creșterea lui V_d ar fi egală cu V_i pe fază, tensiunea nu se schimbă în momentul scurtcircuitului pe această fază din rețeaua a doua și un regulator de tensiune nu ar putea fi influențat. De asemenea, tensiunile între fazele B și C și B și A sunt mai mici decât tensiunea între fazele A și C. Deci rețeaua întreagă unde s'a produs defectul are efecte de supratensiuni pe două faze, fără ca în orice caz să avem ridicări de potențial însemnate pe toate fazele din sistemul cu care această rețea este legată magnetic. Dacă considerăm în plus tensiunea internă a generatorului egală cu E, iar creșterea relativă a potențialului în punctul defectului $K\%$, creșterea se repartizează între punctul unde se află tensiunea internă E și unde această creștere e nulă și ajunge la o valoare mai mică în punctul unde se află regulatorul de tensiune (la bornele generatorului).

Se poate spune deci, că nu este cazul să se afirme că un reglaj al tensiunii intervine în orice caz, chiar dacă ar exista regulatori rapizi de tensiune și că se poate considera constantă tensiunea internă a generatorului înainte și după punerea la pământ, așa cum s'a făcut mai sus, chiar în cazurile de supratensiuni pe secvența

directă în punctul de defect [1]). De altfel, pe o rețea reală se poate calcula cu ușurință valoarea tensiunii la bornele generatorului și anume valoarea ei pe faza unde ar

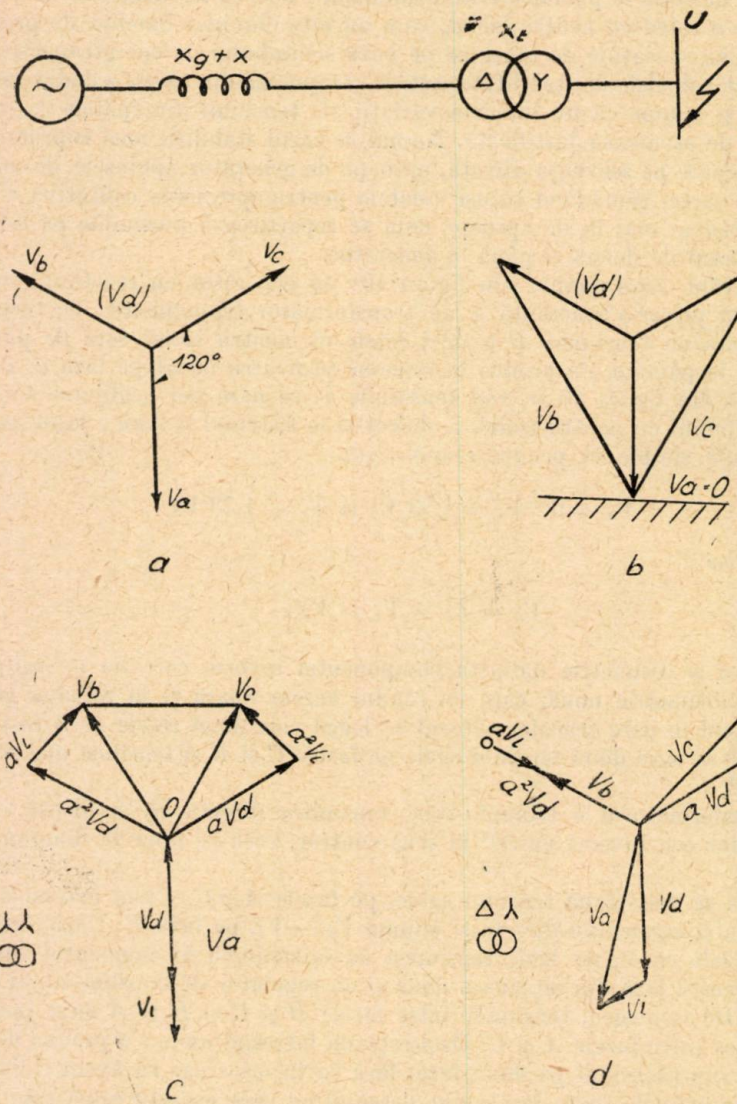

Fig. 10. — Diagrama tensiunilor în rețeaua cu defect și în rețeaua legată magnetic cu prima.

exista regulatori automați de tensiune pentru a se aprecia măsura în care ar putea interveni un asemenea reglaj, în cazul funcționării cu o fază la pământ și timpul

[1]) Dacă se ține seama și de rezistență, valorile tensiunilor capătă o disimetrie și mai mare, ceea ce întărește concluziile de mai sus. *Verificarea prin calcul a supratensiunii prelungite posibile, în ipoteza rezonanței pentru rețele cu neutru izolat*, de Manea Florin.

în care intervine, atunci când apar supratensiuni pe secvența directă în punctul defect. S'ar putea deci ține seama și de acest reglaj.

Fenomenul care se petrece în alternator este extrem de complex, pe de o parte prin conținutul său desechilibrat pe cele trei faze, iar pe de altă parte prin complexitatea părții tranzitorii, dacă se ține seama de saturația pe cele trei faze, reacția indusului și diversele constante de timp ale circuitelor. Ceea ce se poate vedea pe baza reacțiilor cunoscute ale mașinilor sincrone este că:

a) Supratensiunea poate să nu apară chiar în primul moment al defectului, deoarece atunci intervine numai reactanța de scăpări. *Este interesant de relevat că acest lucru s'a observat în practică la unele încercări pe viu ce s'au făcut pentru lămurirea fenomenului atribuit « arcului intermitent ».*

b) Fenomenul tranzitoriu, pentru cazul în care cu reactanța sincronă pe faza respectivă e un început de rezonanță important, nu e clar deoarece creșterea schimbului de energie reactivă activat de relația de rezonanță, ca orice creștere, face să intervină numai reactanța de scăpări și nu cea sincronă. Cea de scăpări limitează însă creșterea.

Această problemă a fenomenului intim din alternator merită pentru a fi complet lămurit un studiu special, pe baze experimentale, și un studiu teoretic pe alte baze mai complete decât cele considerate aici.

Pa baza experienței câștigate până astăzi în exploatarea rețelelor electrice, în fenomenele de stabilitate statică și dinamică se poate afirma că fenomenul trebue să existe. Vom vedea mai departe că pe această cale se explică cazurile în care cercetările cu oscilograful au dovedit că nu există arc intermitent.

In ceea ce privește fenomenul care se petrece în alternator este interesant de observat că: valoarea tensiunii într'un punct oarecare al rețelei, în regim permanent se putea obține, fie, plecând dela tensiunea din spatele reactanței de scăpări, fie, plecând dela tensiunea din spatele reactanței sincrone. Dacă se pune condiția de mai sus, că puterea activă se menține aceeași înainte și după punerea la pământ într'o rețea cu neutru izolat, tensiunea alternatorului se elimină, iar în unități relative, creșterea relativă a tensiunii în punctul căutat rămâne cea dată de formula (5) de mai sus și are aceeași expresie, fie că s'a plecat dela tensiunea din spatele reactanței de scăpări, fie că s'a plecat dela tensiunea din spatele reactanței sincrone și anume

$$U^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\delta_1}}{2 K_1^2 \cos^2 \delta_1}$$

în care δ_1 este unghiul inițial al generatorului considerat într'un caz până la reactanța sincronă, iar în alt caz până la reactanța de scăpări.

In cazul reactanței de scăpări, K_1 este în general în rețelele electrice egal cu 1 (punctele II și III), pe când în cazul reactanței sincrone, care este mult mai mare, el poate fi diferit de 1. Intr'adevăr, $K_1 = \left(1 - \frac{q}{Q}\right)$, Q_1 reprezentând energia reactivă totală este mult mai mic în cazul reactanței sincrone.

Insă formula de mai sus ce stabilește în unități relative valoarea tensiunii, într'un punct față de tensiunea dinainte de defect, duce la două soluții calitativ diferite pentru $K_1=1$ și $K_i \neq 1$. In primul caz tensiunea U rămâne egală cu unitatea, oricare ar fi unghiul δ_1 inițial, pe când în al doilea caz ea are valori diferite, funcție de unghiul δ_1 inițial.

In ceea ce privește punctul din curba de rezonanță pe care se găsește supratensiunea, se poate observa de acum că el este pentru o reactanță mult mai mare decât

cea sincronă în situațiile obișnuite din rețele, reactanța sincronă reprezentând un punct de început al fenomenului. Acest lucru reiese clar din expunerea făcută la punctul 3, unde s'au stabilit puterile maxime ale generatorilor funcționând în gol, pe o sarcină capacitivă, pentru a intra în rezonanță. Dacă se consideră sarcina necapacitivă, ci inductivă, aceste puteri sunt și mai mici. Rezultă concluzia că în cazuri speciale ale unei rețele cu sarcină capacitivă și cu generatori mici sunt posibile fenomene de rezonanță la o punere la pământ. In cazurile reale, reactanța mare cerută de condiția de rezonanță se află dincolo de reactanța sincronă, aceasta din urmă plasându-se de abia la începutul curbei de rezonanță.

Să trecem acum la rezultatele la care se ajunge prin întrebuințarea formulei stabilite pentru componenta directă a tensiunii în punctul de defect.

VI. DOMENIUL DE APLICARE REAL AL FORMULEI DE VARIAȚIE A TENSIUNII ÎN PUNCTUL DE DEFECT

Formula stabilită mai sus (5) duce la două valori pentru tensiune după semnul din fața radicalului. Ea este valabilă cu semnul + până la un unghi $\delta_1 = 45°$ și cu semnul — dela 45° la 90°. Acest lucru se poate verifica cu ușurință dacă îl considerăm pe $K = 1$ (situația inițială cu $q = 0$) și căutăm valoarea lui U care trebue să fie tot 1.

Intr'adevăr, dacă $K_1 = 1$ atunci

$$U = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \sin^2 2\delta_1}}{2 \cos^2 \delta_1} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \sin^2 2\delta_1}}{\cos 2\delta_1 + 1} = 1$$

sau

$$\cos 2\delta_1 = \pm \sqrt{1 - \sin^2 2\delta_1}.$$

Deci când δ_1 e mai mare de 45° se aplică semnul minus în fața radicalului după semnul lui $\cos 2\delta_1$ și semnul plus când δ_1 este mai mic de 45°.

Apare deci că formula se aplică cu semnul + până la un unghi de 45° și cu semnul — dela 45° în sus.

Să căutăm stabilitatea tensiunii în punctul de defect pentru un unghi până la 45° și dela 45° în sus (cu + respectiv — în fața radicalului). Să aplicăm criteriul de stabilitate $\frac{dQ}{dU} < 0$ în punctul de defect.

Se știe că dacă derivata $\frac{dQ}{dU}$ este negativă, tensiunea e stabilă în punctul respectiv. Noi căutăm aici un fenomen cu o permanență în timp, care se stabilește la un moment dat după punerea la pământ.

Energia reactivă totală (care vine și pleacă) în punctul de defect după producerea defectului, dată de generator și consumată de rețea se poate scrie cu notațiile la care s'a convenit mai sus

$$Q' = Q_1 EU \cos \delta_2 - Q_1 U^2 - Q_s U^2 + qU^2 = 0$$

formula (3) dela punctul IV, în care în loc de reactanțe s'a notat cu $Q_1 = \frac{1}{x_1}$, $Q_s = \frac{1}{x_s}$ și $-q = -\frac{1}{x_0}$ adică puterile reactive consumate sub tensiunea

$U = 1$ de aceste reactanțe. Dacă înlocuim tensiunea $E = \frac{1}{\cos \delta_1}\left(1 + \frac{Q_s}{Q_1}\right)$ cu valoarea ei din momentul inițial (formula 2, punctul IV) se obține

$$Q' = (Q_1 + Q_s)\frac{U \cos \delta_2}{\cos \delta_1} - (Q_1 + Q_s - q)\, U^2$$

sau

$$Q' = Q\left(\frac{U}{\cos \delta_1} \cos \delta_2 - K_1 U^2\right),$$

K_1 având aceeași semnificație ca la punctul IV; $Q_1 + Qs$ s'a notat și aici cu Q. Dacă derivăm

$$\frac{dQ'}{dU} = Q\left(\frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} - \frac{U \sin \delta_2}{\cos \delta_1} \cdot \frac{d\delta_2}{dU}\right) - 2 K_1 U.$$

In expresia derivatei de mai sus intervine și variația unghiului δ_2, care e noul unghi al tensiunii, unghiul δ_1 fiind unghiul inițial.

Deoarece puterea activă rămâne aceeași în timpul fenomenului, $P = QUE \sin \delta_2 =$ constant, avem

$$\frac{dP}{dU} = 0 = Q_1 \sin \delta_2 + Q_1 U \cos \delta_2 \frac{d\delta_2}{dU}$$

sau

$$\frac{d\delta_2}{dU} = \frac{-\sin \delta_2}{U \cos \delta_2}$$

$$\frac{dQ'}{dU} = Q\left(\frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} + \frac{\sin^2 \delta_2}{\cos \delta_1 \cos \delta_2}\right) - 2 K_1 U$$

sau dacă înlocuim pe $\sin^2 \delta_2 = 1 - \cos^2 \delta_2$ obținem

$$\frac{dQ}{dU} = Q\left(\frac{1}{\cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2}\right) - 2 K_1 U \qquad (6)$$

Q fiind pozitiv trebue deci ca

$$\frac{1}{\cos \delta_1 \cos \delta_2} - 2 K_1 U < 0.$$

Din păstrarea puterii active înainte și după defect rezultă (punctul IV)

$$\cos \delta_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \delta_1}{U^2}}.$$

Dacă înlocuim pe $\cos \delta_2$ în expresia (6) obținem

$$\frac{1}{\cos \delta_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \delta_1}{U^2}}} - 2 K_1 U < 0.$$

Impărțind cu U care e pozitiv obținem

$$\frac{1}{\cos \delta_1 \sqrt{U^2 - \sin^2 \delta_1}} - 2 K_1 < 0$$

sau

$$U^2 > \frac{1 + 4 K_1^2 \cos^2 \delta_1 \sin^2 \delta_1}{4 K_1^2 \cos^2 \delta_1}$$

Inlocuim pe U^2 cu valoarea găsită din formula (5) (punctul IV)

$$1 \pm \sqrt{1 - 4 K^2_1 \cos^2 \delta_1 \cdot \sin^2 \delta_1} > \frac{1 + 4 K_1^2 \cos^2 \delta_1 \,.\, \sin^2 \delta_1}{2}.$$

Membrul din dreapta are valoarea maximă atunci când $\cos \delta_1 . \sin \delta_1$ e maxim, iar radicalul din membrul din stânga are tot atunci valoarea minimă. Această valoare maximă a lui $\cos \delta_1 \sin \delta_1$ are loc pentru $\delta_1 = 45°$ și este egală cu 1/2. Cu această valoare dacă se consideră expresia cu $+$ înaintea radicalului

$$1 + \sqrt{1 - K_1^2} > \frac{1}{2} + \frac{K_1}{2}.$$

Deoarece K_1 e mai mic ca 1 dar mai mare ca 0, condiția de mai sus este întotdeauna îndeplinită. Aceasta înseamnă că cu atât mai mult pentru unghiuri mai mici de 45°, condiția va fi îndeplinită ($\cos \delta_1 . \sin \delta_1$ mai mic).

Analog raționăm pentru semnul $-$ în fața radicalului

$$1 - \sqrt{1 - K_1 x} > \frac{1}{2} + \frac{K_1 x^2}{2}$$

în care s'a notat cu $x = 4 \cos^2 \delta_1 \sin^2 \delta_1$; x variază între 0 și 1 ($4 \cos^2 \delta_1 . \sin^2 \delta_1 = \sin^2 2 \delta_1$). Se deduce

$$- \sqrt{1 - K_1 x} > \frac{K_1 x^2}{2} - 0{,}5$$

sau

$$\sqrt{1 - K_1 x} < 0{,}5 - \frac{K_1 x^2}{2}.$$

Această expresie nu e posibilă pentru $0 < x < 1$ ($K_1 < 1$).

Deci unghiurile inițiale peste 45° pentru care s'ar fi aplicat semnul $-$ în fața radicalului nu sunt valabile din punct de vedere al stabilității tensiunilor.

Aceasta înseamnă, că un unghi mai mare de 45° nu are soluții stabile nici în funcționare normală, din moment ce la o deplasare infinit mică a energiei reactive, tensiunea nu e stabilă (q poate fi considerat oricât de mic, conducând la o stare apropiată de cea normală fără defect).

Acest rezultat nu trebue să mire pe cei obișnuiți să caute fenomenele instabile dincolo de unghiuri de 90°. In aprecierea stabilității se caută unghiul dintre două rotoare (generator-motor) care nu trebue să depășească 90°. Aici e vorba de un punct similar cu unul intermediar între cele două mașini și pentru care am impus

o lege de variație a puterilor active și reactive apropiată de cea reală, în caz de defect la pământ pe o fază. Vom reveni asupra acestui punct în cazul a mai mulți generatori.

Este interesant totuși de observat că unghiul stabil pentru tensiuni, care este 90° pentru un generator funcționând pe o bară de putere infinită ($U = ct$), se micșorează la 45° în cazul când consumațiile sunt de tipul $P = ct.\ Q = KU^2$.

In concluzie deci unghiul inițial δ, este cuprins între 0 și 45° iar formula ce se aplică pentru aflarea componentei de secvență directă este

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\delta_1}}{2\ K_1^2 \cos^2 \delta_1}. \qquad (7)$$

Notăm în expresia (6) și derivata în punctul de defect care o să ne fie necesară mai târziu sub forma (dacă înlocuim pe E funcție de δ)

$$\frac{dQ'}{dU} = \frac{Q_1 E}{\cos \delta_2} - 2\ U\ (Q - q)$$

sau

$$\frac{dQ'}{dU} = \frac{Q_1 E}{\cos \delta_1} - 2\ UQ$$

pentru momentul ce a precedat defectul și când termenul $Q - q$ poate fi înlocuit de Q, iar $\cos \delta_2$ cu $\cos \delta_1$, derivata având absolut aceeași expresie. Această expresie din momentul inițial, fără defect se poate deduce și direct, așa cum s'a dedus expresia (8) și demonstra la fel că $\frac{dQ'}{dU} < 0$, numai pentru $\delta_1 < 45°$.

Observăm că rezultatele de mai sus se puteau obține simplu pe un grafic, dacă reprezentăm pe o diagramă echilibrul puterilor reactive (fig. 11).

Intr'adevăr ecuația

$$Q_1 E_1 U \cos \delta_2 - U^2 (Q_1 + Q_s - q) = 0$$

sau

$$Q_1 E_1 \cos \delta_2 = (Q - q)\ U \qquad (Q = Q_1 + Q_s)$$

duce la construcția triunghiului $A\ B'\ C'$ în care AC' reprezintă termenul $(Q - q)\ U$, iar la $B'\ C' = \frac{P}{U}$ deoarece $\frac{P}{U} = Q_1 E_1 \sin \delta_2$ — cum P rămâne constant, dreapta $B'\ C'$ va fi întotdeauna egală cu $\frac{P}{U}$. Observăm că produsul $\frac{P}{U} \cdot (Q - q)U = P \cdot (Q - q) = AC' \cdot B'\ C'$ e constant. Aceasta înseamnă că punctul B' se va găsi neapărat pe o hiperbolă care are ca axe asimptotele ei.

Expresia derivatei se urmărește foarte ușor pe acest grafic. Intr'adevăr, termenul pozitiv din această expresie

$$\frac{Q E_1}{\cos \delta}$$

(δ_1 sau δ_2) este reprezentat de dreptele AD respectiv AD', iar cel negativ

$$-2\ (Q - q)U \text{ respectiv } -2QU$$

de dreptele AC respectiv AC' înmulțite cu 2.

Deci punctele D şi D' se găsesc prin trasarea tangentelor în punctele B şi B'. Se vede că derivata este întotdeauna pozitivă dacă punctul B sau B' este dincolo de 45° deoarece valoarea limită când $AD' < 2\ AC'$ este la 45° şi deci şi pe această cale se ajunge la aceleaşi concluzii că unghiul δ_1 respectiv δ_2 trebue să fie sub 45° pentru ca stabilitatea tensiunii să se menţină.

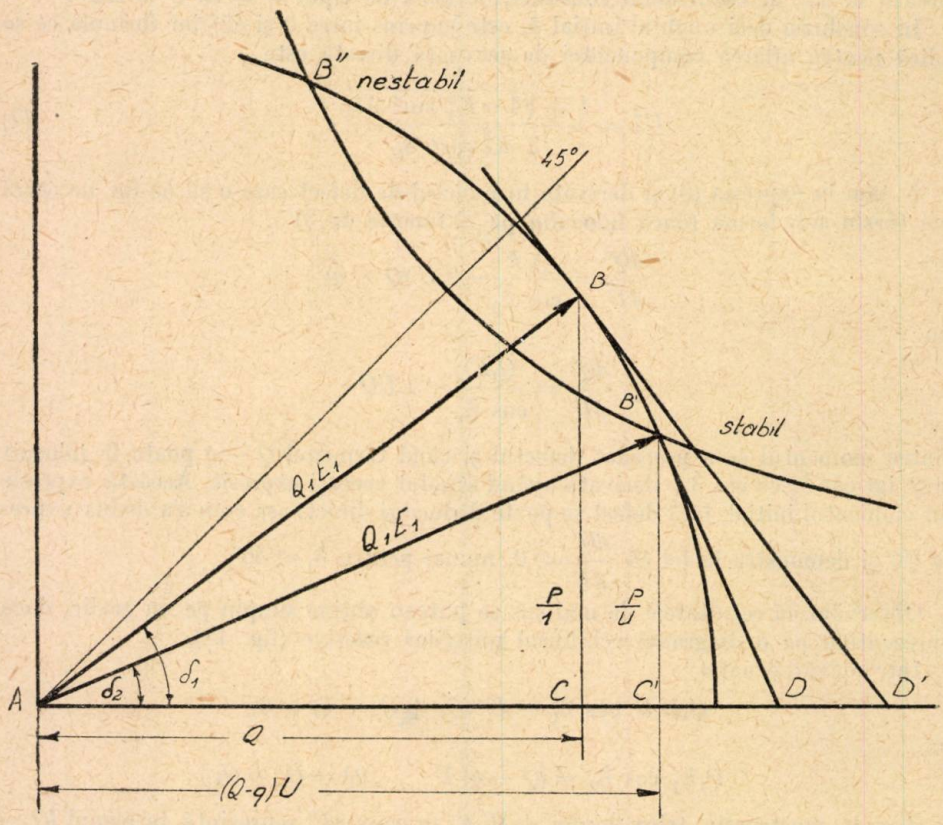

Fig. 11. — Diagrame de funcţionare cu şi fără defect.

Mai observăm că dacă, pentru $U = 1$ am fi considerat ca putere de bază $Q = 1$, atunci ambele grafice pentru momentul iniţial şi cel următor cu defect trebuiau făcute la scara $\frac{1}{Q}$ iar dreptele AC' ne dădeau direct tensiunea $U \cdot \frac{Q-q}{Q}$ sau $K_1 U$, K_1 fiind termenul notat mai sus la punctul IV.

Şi mai simplu tensiunea U pe secvenţa directă se poate măsura direct din raportul dreptelor $BC = P$ şi $B'C' = \frac{P}{U'_d}$ căci $\frac{BC}{B'C'} = U_d$. Construcţia grafică pentru aflarea tensiunii este deci foarte simplă.

a) Se construeşte triunghiul ABC al funcţionării fără defect cu latura

$$AB = Q_1 E_1 \text{ şi unghiul } \delta_1.$$

b) Se construeşte hiperbola $x \cdot y = (Q - q)\ P$.

c) Punctul de intersecție al cercului cu raza AB, cu această hiperbolă, care duce la soluția stabilă ($\delta_2 < 45°$) dă punctul de funcționare, iar raportul $\frac{BC}{B'C'}$ măsoară direct pe U_d. Vom utiliza această construcție grafică în cazul a mai mulți generatori când calea analitică e foarte greoaie.

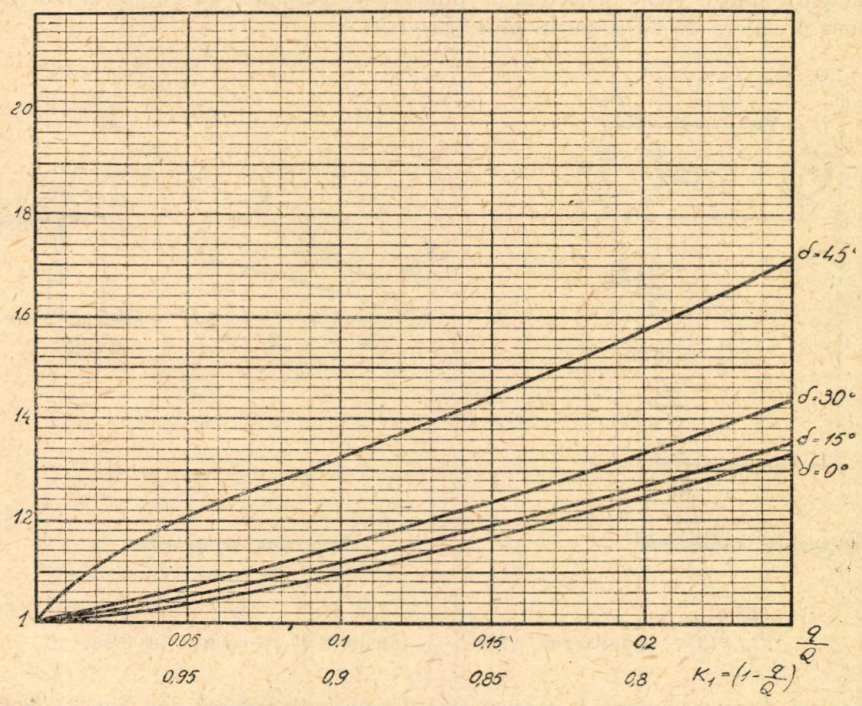

Fig. 12. — Graficul componenței directe a tensiunii în punctul de defect, în funcție de $K_1 = 1 - \frac{q}{Q}$ (sau $\frac{q}{Q}$) pentru diverse valori ale unghiului inițial.

In graficul din figura 12 s'a construit valoarea tensiunii, pe secvența directă, funcție de K_1 pentru diverse valori ale lui K_1 — cuprinse între 1 și 0,75 și diverse unghiuri inițiale ale generatorului unic.

VII. EVALUAREA COMPONENTEI INVERSE ÎN PUNCTUL DE DEFECT AL REȚELEI

Observăm că, deoarece s'a considerat tensiunea internă a generatorului, constantă, variația de tensiune pe secvența directă e datorită exclusiv variației căderii de tensiune în reactanța directă, pentru componenta directă pentru care am stabilit graficul din figura 12. Dacă apreciem (așa cum am făcut la stabilirea termenului K_1 pentru a ține seama de componenta inversă), în evaluarea șuntului echivalent, un coeficient p astfel ca $x_i = p x_d$, atunci în cazul când generatorul este în gol, căderea de tensiune în reactanță directă și inversă legate în serie, sunt în fază pe schema echivalentă a fazei cu defect, iar căderea de tensiune în componenta inversă poate fi egală cu $p \Delta U_d$ și se poate aprecia cu ușurință.

In sarcină lucrurile rămân la fel. Intr'adevăr, un generator debitând o putere activă şi reactivă poate fi adus la un generator echivalent debitând numai putere activă, prin introducerea reactanţei corespunzând sarcinii reactive, în reactanţa echivalentă a noului generator. In acest caz, după cum se vede în figura 13, *b*, pe diagrama tensiunilor, căderea de tensiune este egală în regim fără avarie, cu căderea de tensiune în reţeaua directă, dată de curentul watat. La aceasta se adaugă atunci când apare şuntul echivalent dat de punerea la pământ, un curent dewatat, care produce o cădere de tensiune în plus ($L\omega \cdot I_d$).

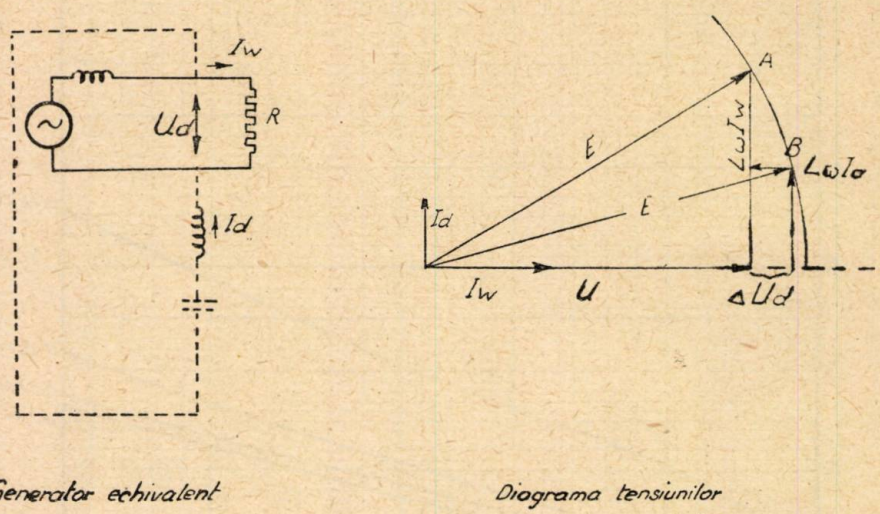

Fig. 13. — Aprecierea căderii de tensiune în reactanţa inversă.

Acelaşi curent dewatat I_d traversează şi reactanţa inversă, iar căderea de tensiune respectivă are mărimea $p \cdot L\omega I_d$. Deci căderea de tensiune va fi în această reactanţă $p\Delta U_d$. Dacă ΔU_d a fost căderea de tensiune pe secvenţa directă, p poate varia într'o reţea reală în sarcină între 0,4—0,8, după cum am arătat la punctul IV şi poate fi apreciat destul de exact în fiecare caz în parte, iar ΔU_d se poate estima direct pe graficul din figura 12.

VIII. APRECIEREA ORDINEI DE MĂRIME A SUPRATENSIUNII PRELUNGITE ÎN CAZ DE PUNERE LA PĂMÂNT A UNEI FAZE PE O LINIE ALIMENTATĂ DE O SINGURĂ ENTRALĂ

Calculul aşa cum este făcut în această parte se aplică numai în cazul unui generator unic, sau a unei centrale cu mai mulţi generatori, funcţionând toţi cu unghiuri aproximativ egale pe bare, aşa cum e cazul în multe reţele reale. In cazul unui generator echivalent cu mai multe uzine, calculul este exact numai dacă fiecare din generatorii ce compun generatorul echivalent ar avea acelaşi unghi faţă de punctul unde s'a produs defectul. Acest lucru va fi demonstrat mai departe la punctul IX, când se vor da soluţii pentru acest ultim caz, cu unghiuri diferite ale generatorilor, caz mult mai defavorabil pentru acest gen de supratensiuni.

Să luăm un exemplu pentru o orientare asupra ordinei de mărime în acest prim caz al unei singure uzine. Să presupunem o linie de 110 kV, cca 120 km, cu un consumator oarecare alimentat dela o uzină hidraulică cu o putere instalată de 20 MVA. Apreciem reactanța sincronă a uzinei la 100%.

Lucrăm în unități relative luând tensiunea de serviciu egală cu 1, pentru punctul unde se va produce defectul, iar puterea de bază, puterea de 20 MVA a uzinei, pentru evaluarea reactanțelor în procente. Reactanțele transformatorilor ridicători sunt 10%, iar reactanța liniei până într'un punct oarecare (unde are loc defectul) 5%. Mai jos s'au evaluat puterile capacitive echivalente, ce intervin în acest punct, cu reactanță 5% de-a-lungul liniei până la transformatorii ridicători.

Aceste date sunt apropiate de ale unei instalații reale.

a) Puterea reactivă absorbită de reactanța generatorului și transformatorii ridicători, plus o porțiune de linie până la locul de defect:

$$-\frac{20\ \text{MVA}}{1{,}15} = 17{,}4\ \text{MVA}$$

b) Sarcina capacitivă absorbită de linie în gol. Pe secvența directă la tensiunea de serviciu: 4,5 MVA

c) Puterea capacitivă a șuntului echivalent, corespunzând curentului total la pământ în caz de defect:

Pe secvența homopolară, la tensiunea de serviciu 3 MVA (aceste date corespund cu o linie de Oțel - Al echivalent cupru 3.70 mm², 3 MVA fiind puterea capacitivă a șuntului echivalent pentru $U = 1$, așa cum a fost definită mai sus (termenul q_s).

A. Uzina de o putere egală cu 20 MVA. Evaluarea supratensiunii prelungite

a) In gol:

termenul $1 - \frac{q_s}{Q} = 1 - \frac{3}{17{,}4 - 4{,}5 - 3} = 0{,}67$ pe secvența directă: ($\delta_1 = 0$ generatorul în gol)

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 \sin 2\,\delta_1}}{2\,K_1^2 \cos^2 \delta_1} = \frac{2}{2K^2} \qquad U_d = \frac{1}{0{,}67} = 1{,}5$$

$$\Delta\, U_d = 0{,}5$$

pe secvența inversă

$$\left(p = \frac{0{,}35}{1{,}15} = 0{,}3\right)$$

$$U_i = 0{,}3 \cdot 0{,}5 = 0{,}15.$$

Valoarea tensiunii secvenței homopolare în punctul de defect este egală cu tensiunea directă plus cea inversă (tensiunea rezultantă zero).

$$U_h = 1{,}5 + 0{,}15 = 1{,}65.$$

Ordinea de mărime a supratensiunii la pământ pe una din fazele sănătoase în locul de defect

$$\overline{E}_p = (1{,}65 - a^2\,1{,}5 - a\,0{,}15)\ E_n = (2{,}475 + j\,1{,}48)\ E_n$$

$$E_p\ (\text{modulul}) = 3{,}05\ E_n$$

b) In plină sarcină:

20 MVA cu cos $\varphi = 0{,}8$ reactanța internă a uzinei o considerăm tot 100%. Punctul de defect în același loc ca mai sus (*a*)

Evaluarea puterilor reactive: Puterea reactivă consumată de reactanța generatorului plus transformator plus linie.

$$Q_1 = \frac{20}{1{,}15} = 17{,}4 \text{ MVA}$$

Puterea reactivă consumată la cos $\varphi = 0{,}8$ de sarcină (se poate presupune că factorul de putere a fost acesta chiar în locul defectului).

$$Q_s = 20 \sqrt{1 - 0{,}8^2} = 20.\ 0{,}6 = 12 \text{ MVA}$$

Deci Q total = 29,4 MVA (17,4 MVA + 12 MVA)

$$K = 1 - \frac{q}{Q} = 1 - \frac{3}{29{,}4} = 0{,}896.$$

Unghiul generatorului se deduce foarte simplu cu mărimile exprimate în unități relative pe diagrama din figura 14: la tensiunea $U = 1$ și curentul $I = 1$ (plină sarcină) căderea de tensiune în reactanța până la locul de defect este 1,15.

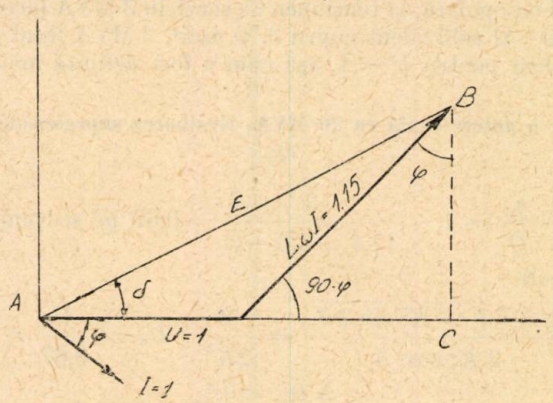

Fig. 14. — Diagrama pentru aflarea unghiului generatorului.

Unghiul acestei căderi de tensiune e dat de perpendiculara pe curentul $I = 1$ corespunzător factorului de putere 0,8 (cos $\varphi = 0{,}8$).

Din diagrama din figura 14 se vede

$$\frac{BC}{AC} = \text{tg } \delta = \frac{1{,}15 \cos \varphi}{1 + 1{,}15 \sin \varphi} = \frac{0{,}92}{1 + 0{,}69} = 0{,}545.$$

$$\delta = 28{,}5^\circ$$

Tensiunea secvenței directe în punctul de defect

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K^2 \sin^2 2\delta}}{2 K^2 \cos^2 \delta}$$

și cu valori numerice

$$U_d^2 = \frac{1{,}665}{2\,(0{,}8 \cdot 0{,}78)^2}$$

$$U_d = 1{,}3 \qquad \Delta U_d = 0{,}3$$

pe secvența inversă, considerând aici $p = 0{,}55$, ținând seama de sarcină

$$U_i = 0{,}55 \,.\, 0{,}3 = 0{,}165.$$

Tensiunea secvenței homopolare în punctul de defect (ca mai sus)

$$U_n = 1{,}3 + 0{,}55.\ 0{,}3 = 1{,}46.$$

Evaluarea supratensiunii prelungite pe una din fazele sănătoase

$$\overline{E_p} = 1{,}46 - a^2\,1{,}3 - a\,0{,}165 = 2{,}2 + j\,1{,}265 \quad (E = 1)$$

modulul acestei tensiuni

$$E_p = 2{,}54.$$

Se obține deci o tensiune a fazelor sănătoase de 2,54 ori tensiunea simplă față de pământ, mai mică decât în gol.

B. Puterea uzinei mai mică sau mai mare de 20 MVA

Dacă uzina hidraulică din lipsă de apă ar funcționa numai cu jumătate din grupuri, adică cu 10 MVA, tot în plină sarcină, supratensiunea devine pentru 10 MVA și mai mare, deoarece termenul K devine mai mic (diagrama din figura 12). La fel supratensiunea crește dacă în plină sarcină factorul de putere ar fi fost mai bun de 0,8 (la fel se micșorează K_1).

Să considerăm acum o uzină de putere dublă 40 MVA, funcționând legată la aceeași linie în plină sarcină cu $\cos \varphi = 0{,}8$. Luăm ca putere de bază 40 MVA și considerăm pentru simplificare că și de rândul acesta, defectul s'a produs pe un punct al liniei până la care reactanța în unități relative a liniei ar fi fost la această nouă putere de bază tot 0,05 ca mai sus. Tot restul reactanțelor (generatori transformatori) au aceeași valoare în unități relative.

Puterea reactivă consumată de generator

$$Q_1 = \frac{40}{1{,}15} = 34{,}8 \text{ MVA}.$$

Puterea reactivă consumată de sarcină

$$Q_s = 40 \cdot 0{,}6 = 24 \text{ MVA} \cdot$$

Deci Q total $= 58{,}8$ MVA

Puterea capacitivă a șuntului echivalent pentru tensiunea $U = 1$ aceeași linie) $q = 3\ MVA$

$$K = 1 - \frac{3}{58{,}8} = 0{,}949.$$

Generatorul rămâne la unghiul de 28,5°, diagrama fiind identică cu cea făcută pentru generatorul de 20 MVA.

$$Ud^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K^2 \sin^2 2\delta}}{2 K^2 \cos^2 \delta} = \frac{1 + \sqrt{1 - (0{,}949)^2 \cdot (0{,}839)^2}}{2\,(0{,}949 \cdot 0{,}878)^2}.$$

$$U_d = 1{,}105$$

$$U_i = 0{,}105 \cdot 0{,}55 = 0{,}0575.$$

Tensiunea homopolară

$$U_h = 1{,}105 + 0{,}00575 = 1{,}1625.$$

Tensiunea la pământ a uneia din fazele sănătoase

$$\bar{E}_p = 1{,}162 - a^2\, 1{,}105 - a\, 0{,}0575 = 1{,}75 + j\, 1{,}01$$

$$E_p \text{ modul} = 2.$$

Se vede că tensiunea ce se obține este mai scăzută. Dacă se consideră o putere mult mai mare, această tensiune se apropie de 1,73. Calculul de orientare de mai sus s'a făcut pentru verificarea unei situații, observată pe o linie reală care are la un cap o uzină hidraulică de 20 MVA, iar la celălalt cap o uzină termică de peste 40 MVA, ce alimentează direct consumatorii. Sensul scurgerii energiei este către uzina mare.

După o serie de încercări, linia a fost pusă cu neutrul la pământ, numai la uzina de 20 MVA și lăsată cu neutru izolat de-partea uzinei puternice cu peste 40 MVA. In mulți ani de exploatare soluția s'a dovedit bună. Vom vedea mai departe, după ce vom introduce și efectul întreruperii accidentale a liniei în caz de defect, că și teoretic soluția pare bună.

Tragem deocamdată următoarele concluzii:

a) La aceeași instalație supratensiunea prelungită este cu atât mai mare, cu cât consumația de energie reactivă a sarcinei este mai mică.

b) O putere mai mare a generatorilor legați la rețea micșorează valoarea supratensiunii prelungite, căci se micșorează Q total din formulă. O rețea mai bogată o mărește, căci mărește pe q din formulă și se micșorează K_1 (fig. 12).

c) Ordinea de mărime a acestei supratensiuni, așa cum reiese din asemenea calcule este aceeași cu cea observată în exploatări. Observăm că pentru un caz concret se pot face calcule mult mai exacte, dacă ar fi necesar. Ele conduc în genere la valorile care s'au observat pentru supratensiunea « arcului intermitent ».

In special la calculul funcționării în gol trebue să se țină seama în calculele exacte și de rezistență și de reactanța internă a generatorului, care e 100% și chiar mai mică la plină sarcină în general, dar are alte valori în gol, în general mult mai mari.

In privința acestei reactanțe echivalente, pentru cazul când se caută o rezonanță trebue să observăm că asemenea aprecieri sunt numai de orientare ca ordine de mărime. Este vorba aici de un fenomen de fero-rezonanță care se știe că *poate avea loc și pe valorile reactanței echivalente, considerată nesaturată pe curba de magnetizare, reactanță mult mai mare decât cea echivalentă de regim permanent, care se deduce ținând seama de saturație.*

Dar la o reactanță echivalentă mai mare, supratensiunea se accentuează (Q mai mic), ceea ce duce la concluzia că *evaluările pe această cale ar trebui făcute acoperitor*

considerându-se reactanța care apare, neglijând saturația în alternator, adică reactanța sincronă echivalentă, cea mai mare care poate apare.

In gol rezistența circuitelor va limita valoarea indicată mai sus, care pentru generatori mai mici capătă valori extrem de mari. In sarcină însă, pentru cazurile când supratensiunea prelungită nu depășește o anumită limită, rezistența nu are aceeași importanță, deoarece dacă ținem seama de faptul că puterile active nu variază din cauza punerii la pământ, curentul wattat scade invers proporțional cu creșterea tensiunii și deci scad și pierderile de tensiune respective. S'ar putea întâmpla chiar cazuri, la sarcini mari active, cu factor de putere apropiat de 1 când dacă se ține seama de rezistență se ajunge la o valoare sensibil mai mare a supratensiunii prelungite după cum vom vedea mai departe la punctul IX.

IX. EFECTUL REZISTENȚEI. EFECTUL UNEI CARACTERISTICI $Q = f(U)$ DIFERITĂ DE CEA PRESUPUSĂ $Q = KU^2$

A. Efectul rezistenței. Dacă considerăm tot un generator unic echivalent cu tensiune internă E, legat de rândul acesta printr'o impedanță Z (fig. 6) la punctul unde se produce defectul la pământ și scriem ecuațiile de echilibru ale puterilor reactive în funcție de tensiunea U și impedanțele Z obținem,

$$0 = \frac{EU}{Z}\cos(\delta_1 + \alpha) - \frac{U^2}{Z}\cos\alpha - \frac{U^2}{x_s} \tag{8}$$

în care unghiul α este definit astfel:

$$\alpha = 90^\circ - \operatorname{arc\,tg}\frac{L\omega}{R} \quad Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}\,.$$

Iar pentru puterile active

$$0 = \frac{EU}{Z}\sin(\delta_1 + \alpha) - \frac{U^2}{Z}\sin\alpha - P\,. \tag{9}$$

Dacă presupunem și aici că puterea activă rămâne aceeași, iar puterea reactivă variază cu U^2 după caracteristica $Q_s\,U^2$, în care Q_s este puterea reactivă sub tensiunea $U = 1$ obținem notând $\frac{1}{Z} = Q_1$ pentru situația fără defect $(U = 1)$

$$Q_1 E\cos(\delta_1 + \alpha) - (\cos\alpha)\,Q_1 - Q_s = 0\,. \tag{10}$$

iar pentru cea cu defecte la pământ care introduce un șunt capacitiv pe secvența directă $\left(\frac{1}{x_s} = q\right)$

$$Q_1 EU\cos(\delta_2 + \alpha) - [(\cos\alpha)\,Q_1 + Q_s - q)]\,U^2 = 0\,. \tag{11}$$

Din expresia (9) scriem analog situația ce rezultă înainte și după defect. Inainte $(U = 1)$,

$$Q_1 E\sin(\delta_1 + \alpha) - Q_1\sin\alpha - P = 0\,.$$

Iar după defect

$$Q_1 EU\sin(\delta_2 + \alpha) - Q_1\,U^2\sin\alpha - P = 0\,.$$

Dacă puterea activă P este mult mai mare decât $Q_1 \sin \alpha$ ($\sin \alpha$ e foarte mic), iar U nu e mult diferit de 1, cum este cazul aici, avem

$$Q_1 E \sin (\delta_1 + \alpha) \cong Q_1 EU \sin (\delta_2 + \alpha)$$

de unde

$$\sin (\delta_2 + \alpha) = \frac{\sin (\delta_1 + \alpha)}{U}$$

$$\cos (\delta_2 + \alpha) = 1 - \sqrt{\frac{\sin^2 (\delta_1 + \alpha)}{U^2}}$$

înlocuind în (11) obținem

$$Q_1 E \sqrt{1 - \frac{\sin^2 (\delta_1 + \alpha)}{U^2}} - (Q_1 \cos \alpha + Q_1 - q)\, U = 0$$

pe $Q_1 E$ îl înlocuim din expresia (10) în care mai notăm

$$Q_1 \cos \alpha + Q_s = Q'$$

$$\frac{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 (\delta_1 + \alpha)}{U^2}}}{\cos (\delta_2 + \alpha)} = \frac{Q' - q}{Q'} U$$

la fel ca în primul caz, notăm

$$\frac{Q' - q}{Q'} = K_1.$$

Apoi ridicăm la pătrat și obținem

$$K_1^2 \cos^2 (\delta_1 + \alpha)\, U^4 - U^2 + \sin^2 (\delta_1 + \alpha) = 0$$

sau

$$U^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 K_1^2 \sin^2 (\delta_1 + \alpha) \cos^2 (\delta_1 + \alpha)}}{2 K_1^2 \cos^2 (\delta_1 + \alpha)}$$

sau analog ca în primul caz (punctul VI);

$$Ud^2 = \frac{1 + \sqrt{1 + K_1^2 \sin^2 2 (\delta_1 + \alpha)}}{2 K_1^2 \cos^2 (\delta_1 + \alpha)} \qquad (12)$$

în care $\delta_1 + \alpha \leqslant 45°$.

Se observă analogia totală dintre această expresie și expresia găsită în cazul când se neglija rezistența cu diferențele.

Unghiul δ_1 a fost înlocuit de un unghi ceva mai mare și anume $(\delta_1 + \alpha)$. Acest lucru are ca efect o sporire a valorii lui U (diagrama din fig. 12).

Termenul K_1 are aici o valoare mai mică deoarece în locul lui $Q = Q_1 + Q_s$ în primul caz intervine acum $Q' = Q_1 \cos \alpha + Q_s$, în care $\cos \alpha < 1$ întotdeauna, iar pe de altă parte pentru același circuit $\frac{1}{Z} = Q_1$ e mai mic ca $\frac{1}{x}$ unde s'a neglijat rezistența. Deci $Q' < Q$ de unde K_1 din acest al doilea caz este întotdeauna mai mic ca cel calculat numai cu reactanța.

Acest lucru atrage un nou spor pentru tensiunea directă U_d ce rezultă din calcul (K_1 mai mic, fig. 12). Se trage *deci concluzia că pentru cazurile în care sarcina activă este mare*, unghiul δ_1 se apropie de 45°. Pentru deplasări relativ mici ale tensiunii U, cum este cazul fenomenului studiat aici, valoarea tensiunii deduse din neglijarea rezistenței *cu ajutorul formulei 5 dela punctul IV pentru aflarea tensiunii fazelor sănătoase, este inferioară celei reale, apropiată de cea din formula* (12).

Pentru a ne apropia mai mult de valoarea reală în asemenea cazuri (sarcina activă mare și U mic, apropiat de 1), în formula dedusă la punctul IV este cazul să introducem:

a) unghiul α al impedanței, care se adaugă la unghiul generatorului

b) K_1 micșorat, la noua lui valoare

$$K_1 = \frac{Q_1 \cos\alpha + Q_s - q}{Q_1 \cos\alpha + Q_s},$$

în care

Q_s = puterea reactivă a sarcinii,

q_s = puterea reactivă a șuntului echivalent,

$$Q_1 = \frac{1}{Z},$$

$$\alpha = 90° - \text{arc tg}\frac{L\omega}{R}.$$

Credem că o primă evaluare a posibilităților de apariție a fenomenului într'o rețea oarecare se poate face prin aplicarea formulei simplificate recomandată la punctul IV, în care se introduce unghiul de 45° care dă maximum de efect, iar reactanțele interne ale generatorilor se consideră pentru generatorii nesaturați, deducându-se exact factorul K_1 după ce s'a calculat în prealabil valoarea șuntului echivalent capacitiv cel mai desavantajos, care poate apare în rețeaua respectivă în caz de scurtcircuit la pământ, pe una din liniile ce pleacă dela bară (de obicei la capul liniei celei mai lungi sau în spatele unei bobine de reactanță de limitare a scurtcircuitelor).

Mai trebue menționat că în cazul când se introduc și rezistențele circuitelor se obține pe cele două faze sănătoase *două tensiuni inegale*. Pe o fază se obține o tensiune ușor sporită, iar pe a doua ceva mai mică decât în cazul când se neglijează rezistențele.

B. Efectul sarcinii reactive

Nu variază exact după criteriile ce s'au luat în calcul

$$Q = Q_1 U^2$$

(Q_1 = puterea reactivă când se aplică $U = 1$), ci după o curbă apropiată de aceasta. In unele cazuri, care sunt excepții, curba poate diferi sensibil de cea ideală și ar putea conduce la sporuri sau micșorări a valorii tensiunii prelungite. Să încercăm și aici să lămurim care sunt cazurile periculoase pentru apariția fenomenului, în asemenea cazuri excepționale.

Să considerăm condiția de echilibru a puterilor reactive după defect (punctul IV, formula (3)).

$$Q_1 EU \cos\delta_2 - (Q_1 + Q_s - q)\, f(U) = 0,$$

în care considerăm că variația energiei reactive totale se va face după o funcțiune $f(U)$, iar nu cu U^2 ca înainte.

Dacă considerăm că puterea activă a rămas aceeași și înlocuim pe $\cos \delta_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \delta_1}{U^2}}$, (punctul IV), iar pe E îl deducem din situația dinainte de defect pentru care de rândul acesta

$$f(U) = 1 = U \quad E = \frac{1}{\cos \delta_1}\left(1 + \frac{Q_s}{Q_1}\right)$$

obținem

$$\frac{(Q_1 + Q_s)}{\cos \delta_1} \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \delta_1}{U^2}} = (Q_1 + Q_s - q) f(U).$$

Notăm

$$Q_1 + Q_s = Q$$

iar (punctul IV)

$$1 - \frac{q}{Q} = K_1$$

se obține

$$\frac{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \delta_1}{U^2}}}{\cos \delta_1} = K_1 f(U)$$

de unde

$$- U^2 + \sin^2 \delta_1 + K_1^2 \cos^2 \delta_1 [f(U)]^2 \cdot U^2 = 0.$$

Problema ce ne interesează practic este ce devine U, dacă curba $f(U)$ nu este egală cu U^2 ci cu $[f(U)]^2 = (1 + c)\, U^2 - c$, adică pentru valori ale lui U mai mari ca 1 trece deasupra sau dedesubtul curbei lui U^2 după semnul lui c. Dacă înlocuim pe $[f(U)]^2 = (1 + c)\, U^2 - c$ obținem

$$K_1^2 \cos^2 \delta_1 (1 + c)\, U^4 - (1 + c k_1^2 \cos^2 \delta_1)\, U^2 + \sin^2 \delta_1 = 0$$

sau

$$U^2 = \frac{1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1 + \sqrt{(1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1)^2 - 4 K_1^2 \cos^2 \delta_1 (1 + c) \sin^2 \delta_1}}{2 K_1^2 \cos^2 \delta_1 \cdot (1 + c)}$$

sau dacă împărțim cu $(1 + c)$ peste tot

$$U^2 = \frac{\frac{1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1}{1 + c} + \sqrt{\left(\frac{1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1}{1 + c}\right)^2 - K_1^2 \frac{\sin^2 2 \delta_1}{1 + c}}}{2 K_1^2 \cos^2 \delta_1}$$

sau

$$U^2 = \frac{\frac{1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1}{1 + c} + \sqrt{\frac{1}{(1 + c)}\left[\frac{(1 + c K_1^2 \cos^2 \delta_1)^2}{1 + c} - K_1^2 \sin^2 2 \delta_1\right]}}{2 K_1^2 \cos^2 \delta_1}$$

Dacă comaprăm această formulă cu formula (7), observăm că ea duce la valori mai mari sau mai mici pentru U, după semnul lui c. Figura 29 arată două curbe reale ale caracteristicei statice a sarcinii $Q = f(U)$ pentru diverse ramuri de industrie și punctat curba $Q = U^2$. Una din ele ar putea fi asimilată pentru U apropiat de 1 cu o curbă de forma

$$[f(U)]^2 = (1 + c)\, U^2 - c,$$

iar a doua cu

$$[f(U)]^2 = (1 - c)\, U^2 + c.$$

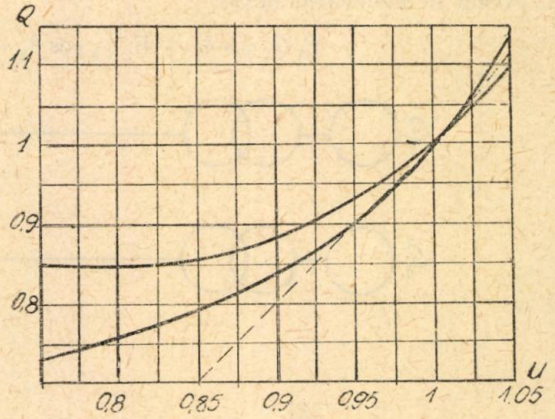

Fig. 15.—Curbe $Q = f(U)$ reale la două tipuri de rețele. Punctat, curba $Q = Q_s\, U^2$.

In general curbele sunt foarte apropiate de $Q = U^2$, pentru U apropiat de 1, totuși semnalăm că pot exista cazuri în care caracteristicele sarcinei să accentueze fenomenul. In aceste cazuri un calcul de evaluare s'ar putea face cu formula găsită mai sus, evaluând pe c al curbei reale $Q = f(U)$ printr'o construcție grafică. Specificăm că este vorba de Q total, așa cum a fost definit până acum și care conține deci înafar de caracteristica statică a sarcinii reactive și caracteristica statică reactivă dată de reactanța internă a generatorului, care variază numai cu U^2 [$Q_{\text{total}} = Q_1$ (generator) $+ Q_s$ (sarcină)].

In cazurile curente, curbele $Q = f(U)$ sunt foarte apropiate de $Q = Q_s\, U^2$, în special în jurul valorii $U = 1$ și nu este cazul (fig. 15) să se facă o examinare mai petailată a acestor împrejurări înafară de unele cazuri speciale.

X. CAZUL A DOUĂ UZINE SAU A DOI GENERATORI FUNCȚIONÂND CU UNGHIURI DIFERITE PE PUNCTUL UNDE S'A PRODUS DEFECTUL DE PUNERE LA PĂMÂNT A UNUI CONDUCTOR

S'a afirmat mai sus că numai dacă generatorii au același unghi se poate construi în cazul de față, un generator echivalent pentru aprecierea supratensiunii ce apare, în caz de punere la pământ într'un punct al rețelei. Să demonstrăm acest lucru și să găsim modul de a stabili ordinea de mărime a supratensiunii în acest ultim caz, cu generatori care au unghiuri diferite. Să luăm mai întâi cazul mai simplu a doi generatori G_1 și G_2, debitând amândoi energie pe o bară comună prin intermediul unor reactanțe totale x_1 și x_2 (a liniilor, transformatorilor și generatorilor respectivi). Dela această bară se consumă înainte de defect o putere activă P_s și puterea reactivă Q_s sub tensiunea nominală $U_n = 1$.

Dacă scriem ecuațiile de echilibru ale puterilor reactive pe bara consumatorilor avem

$$\frac{E_1\, U_n}{x_1} \cos \delta_1 - \frac{U_n^2}{x_1} + \frac{E_2\, U_n}{x_2} \cos \delta_2 - \frac{U_n^2}{x_2} - Q_s = 0$$

înlocuim și aici pe $\frac{1}{x_1} = Q_1$; $\frac{1}{x_2} = Q_2$.

In momentul inițial fără defect avem $U = 1$:

$$E_1 Q_1 \cos \delta_1 + E_2 Q_2 \cos \delta_2 - Q_1 - Q_2 - Q_s = 0.$$

Notăm pe $Q_1 + Q_2 + Q_s = Q$ care este totalul puterilor reactive consumate de toate circuitele când se aplică tensiunea $U = 1$ în punctul unde se va produce defectul (puterea minimă de scurtcircuit).

Avem în momentul inițial

$$E_1 Q_1 \cos \delta_1 + E_2 Q_2 \cos \delta_2 - Q = 0 \tag{13}$$

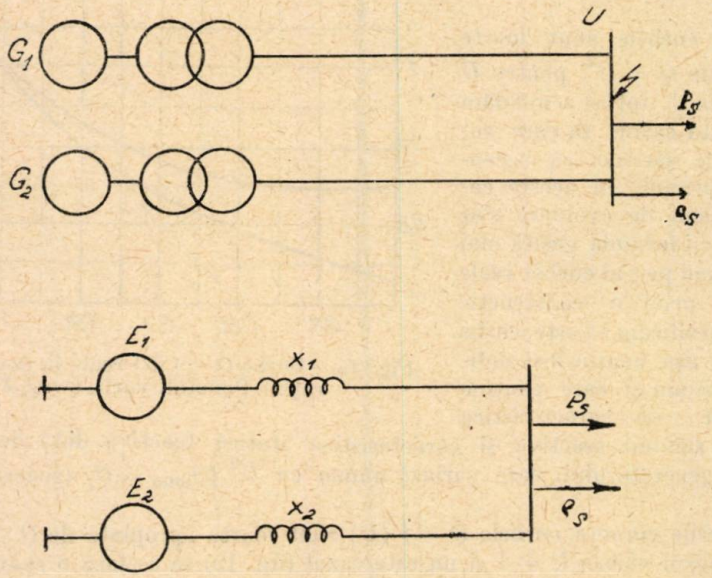

Fig. 16. — Doi generatori debitând pe o bară unde se produce un defect la pământ.

după introducerea puterii reactive capacitive dată de punerea la pământ $- qU^2$ (q este puterea capacitivă a șuntului echivalent).

Ecuația (13) devine

$$E_1 Q_1 U \cos \delta_1' + E_2 Q_2 U \cos \delta_2' - (Q - q) U^2 = 0 \tag{14}$$

sau

$$E_1 Q_1 \cos \delta_1' + E_2 Q_2 \cos \delta_2' - (Q - q) U = 0.$$

Observăm că poate ar fi fost preferabil de aici înainte să se utilizeze alte notații, mai obișnuite, în locul lui Q_1, Q_2, Q, q, care de fapt sunt niște admitanțe și ar fi putut fi notate cu Y_1, Y_2, Y și y. S'au lăsat aceleași notații ca și în cazul generatorului unic, deoarece rămân interesante situațiile ce se deduc din funcționarea dinainte de defect, cu $U_n = 1$, și unde deci Y_1, Y_2 etc. reprezintă și consumațiile de puteri reactive ale circuitelor respective cu $U_n = 1$ aplicat.

S'ar putea și aici ca în primul caz să se rezolve analitic ecuația de mai sus, punând următoarele condiții complimentare conținute în natura fenomenului:

— puterea activă a sarcinii să fie aceeași înainte și după punerea la pământ,
— puterea fiecărui generator în parte să nu se schimbe după punere la pământ.

Rezolvarea analitică duce pentru tensiunea U la o ecuație de gradul 8, ecuație greu de discutat din cauza termenilor foarte numeroși pe care îi conține ca coeficienți. In schimb, construcția grafică similară cu cea făcută în cazul unui singur generator este extrem de interesantă, atât pentru un examen calitativ al fenomenului, cât și pentru calculele cantitative. Să prezentăm pe o diagramă egalitățile (13) și (14) (fig. 17).

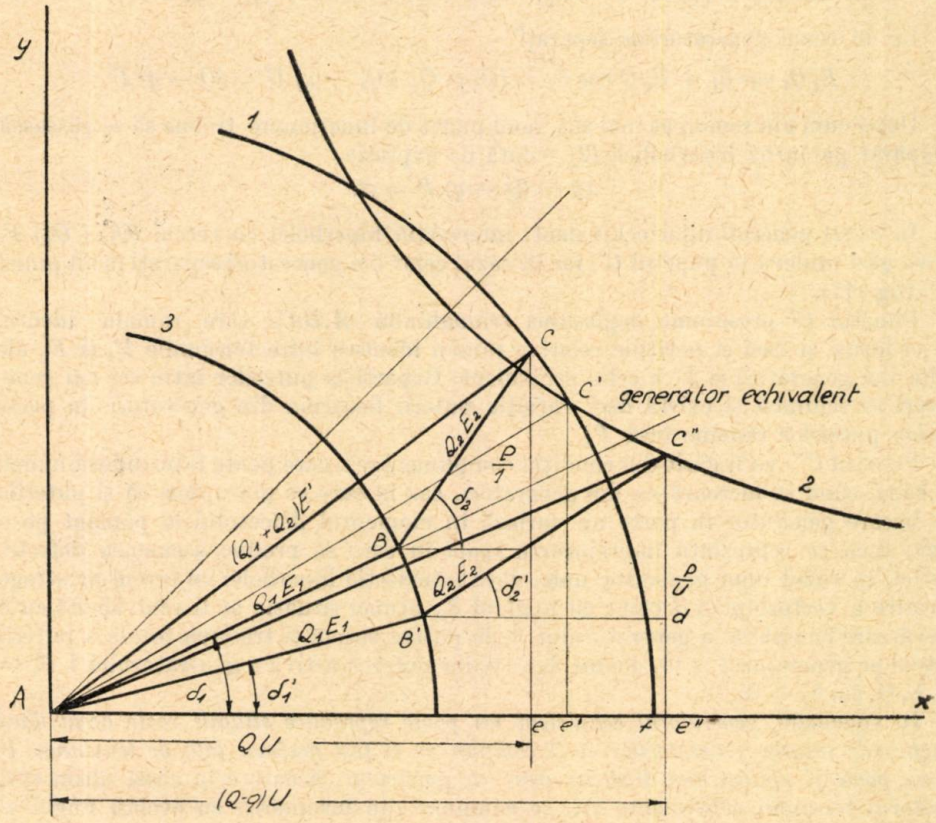

Fig. 17. — Diagrama tensiunilor în cazul a doi generatori când se consideră un generator echivalent (AC cu deplasare în AC') și doi generatori separați (AC cu deplasare în AC'').

Să examinăm în primul rând ce reprezintă pe diagramă generatorul echivalent. In momentul inițial (formula 13) AB reprezintă valoarea $Q_1 E_1$ cu unghiul tensiunii E_1, iar BC valoarea $E_2 Q_2$ cu unghiul tensiunii E_2. Generatorul echivalent ar fi reprezentat pe această diagramă de vectorul AC.

$$AC = (Q_1 + Q_2)\, E'$$

în care E' este dedus din relația

$$Q_1 E_1 + Q_2 E_2 = (Q_1 + Q_2)\, E'.$$

In cazul generatorului echivalent se lucrează cu această nouă tensiune E' și cu o reactanță a generatorului unic egală cu cele două reactanțe în paralel $\left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} = Q_1 + Q_2\right)$.

Să admitem deci, că am fi construit și tensiunea generatorului echivalent, după funcționarea grupurilor în momentul inițial (dreapta AC) și să trecem la diagrama de funcționare cu defect.

Ecuația în caz de defect pentru echilibrul puterilor reactive este pentru generatorul echivalent

$$E \cdot (Q_1 + Q_2) \cos \delta' = (Q_1 + Q_2 + Q_s - q)\, U = (Q - q)\, U .$$

Iar în cazul generatorilor separați

$$E_1 Q_1 \cos \delta_1' + E_2 Q \cos \delta_2' = (Q_1 + Q_2 + Q_s - q)\, U = (Q - q)\, U.$$

După cum am remarcat mai sus, noul punct de funcționare trebue să se găsească neapărat pe curba hiperbolică (2) redată de expresia

$$xy = (Q - q)\, P = ct.$$

In cazul generatorului echivalent, intersecția hiperbolei cu cercul $(Q_1 + Q_2)\, E'$ se va găsi undeva în punctul C', iar în cazul celor doi generatori separați în alt punct C'' (fig. 17).

Punctul C' presupune deplasarea triunghiului A,B,C, care rămâne identic cu el însuși și deci și pozițiile relative rămân identice între tensiunile E_1 și E_2 ale celor doi generatori și E' a celui echivalent. Repartiția puterilor între cei doi generatori se schimbă și există deci variația puterii fiecăruia din generatori în parte (suma puterilor rămâne însă P).

Punctul C'' va fi găsit din condiția complimentară, care poate fi introdusă numai în cazul când se lucrează cu doi generatori, caz în care se presupune că și puterile pe fiecare generator în parte nu variază în momentul defectului la pământ pe o fază, ceea ce reprezintă împrejurarea reală în care se produc asemenea defecte. Astfel, în cazul unui generator unic, dacă intersecția hiperbolei cu cercul ar atrage o rotire a vectorului AB chiar cu unghiul δ_1, atunci situația ar fi echivalentă cu o descărcare completă a generatorului 1 de putere activă și trecerea totală a puterii active pe generatorul 2 (δ_1 devine $\delta_1 = 0$, iar puterea activă a generatorului 1 $P_1 = E_1 Q_1 \sin \delta_1 = 0$).

In concluzie, *generatorul echivalent nu poate reproduce situații reale decât dacă unghiurile tuturor generatorilor ce îl compun ar fi fost aceleași față de tensiunea U și nu poate fi aplicat aici decât în acest caz particular*, deoarece în acest ultim caz, vectorul tensiunii echivalente AC se compune din însumarea cu același unghi al vectorilor $Q_1 E_1, Q_2 E_2 \ldots$ etc., iar o deplasare a acestui vector al tensiunii echivalente nu schimbă repartiția puterilor active, adică proiecțiile pe dreapta puterilor ($e\,C$ sau $e'\,C'$ pe figură) care dau puterile ce le ia fiecare grup $E_1 Q_1 \sin \delta_1 \cdot U$, $E_2 Q_2 \sin \delta_2 U$ etc., aceste puteri rămânând mereu în același raport între ele ca în cazul funcționării fără defect.

Să vedem acum ce devine punctul de funcționare când se consideră cei doi generatori separați și se introduce condiția suplimentară, ca puterile pe fiecare generator să rămână aceleași după defect. Pentru găsirea noului punct de funcționare știm în primul rând că el se va găsi pe hiperbola 2, care rămâne aceeași, deoarece ordonata înmulțită cu abscisa noului punct rămâne $(Q - q)\, U \cdot \dfrac{P}{U} = ct =$ $= P \cdot (Q - q)$, ca și în cazul generatorului echivalent.

Construim în primul rând această hiperbolă. Să căutăm acum un alt loc al punctului C' introducând condiția ca puterile totale și pe fiecare generator să se păstreze aceleași (fig. 17 și 18).

Să presupunem, că generatorii funcționau mai întâi în punctul C cu unghiurile δ_1 și δ_2 iar apoi în punctul C'' cu unghiurile δ_1' și δ_2'. Dreptele $e''C''$ sunt întotdeauna egale cu $e''C'' = Q_1 E_1 \sin \delta_1' + Q_2 E_2 \sin \delta_2' = \frac{P_1 + P_2}{U} = \frac{P}{U}$.

Dacă scriem

$$Q_1 E_1 U \sin \delta_1' = P_1$$

$$Q_2 E_2 U \sin \delta_2' = P_2 .$$

Coordonatele punctului C'' trebue să fie

$$y = \frac{P}{U} = \frac{P}{P_1} \cdot \frac{P_1}{U} = \frac{P}{P_1} Q_1 E_1 \sin \delta_1' .$$

Se mai poate exprima

$$y = \frac{P}{P_2} \cdot \frac{P_2}{U} = \frac{P}{P_2} Q_2 E_2 \sin \delta_2'$$

iar abscisa

$$x = (Q - q) U = Q_1 E_1 \cos \delta_1' + Q_2 E_2 \cos \delta_2'.$$

Dacă înlocuim pe

$$\cos \delta_1' = \sqrt{1 - \frac{P_1^2 y^2}{P^2 x Q_1^2 E_1^2}}$$

$$\cos \delta_2' = \sqrt{1 - \frac{P_2^2 y^1}{P^2 x Q_2^2 E_2^2}}$$

deduse din expresiile lui y, obținem

$$x = \sqrt{Q_1^2 E_1^2 - \frac{P_1^2}{D^2} y^2} + \sqrt{Q_2 E_2^2 - \frac{P_2^2}{P^2} y^2} .$$

Această ecuație o desfacem în $x = x_1 + x_2$, în care

$$x_1 = \sqrt{Q_1^2 E_1^2 - \frac{P_2^2}{P^2} y^2}$$

$$x_2 = \sqrt{Q_2^2 E_2^2 - \frac{P_2^2}{P^2} y^2} .$$

Cele două expresii de mai sus reprezintă două elipse

$$x_1^2 + \frac{P_1^2}{P^2} y^2 = Q_1^2 E_1^2 .$$

și

$$x_2^2 + \frac{P_2^2}{P^2} y^2 = Q_2^2 E_2^2 .$$

Pentru $x = 0$ $\qquad y_1' = Q_1 E_1 \frac{P}{P_1} \qquad y_2' = Q_2 E_2 \frac{P}{P_2}$

pentru $y = 0$ $\qquad x_1' = Q_1 E_1 \qquad x_2' = Q_2 E_2$

în care P este întotdeauna mai mare ca P_1 și P_2 și deci y_1' și y_2' sunt mai mari ca $Q_1 E_1$ și $Q_2 E_2$.

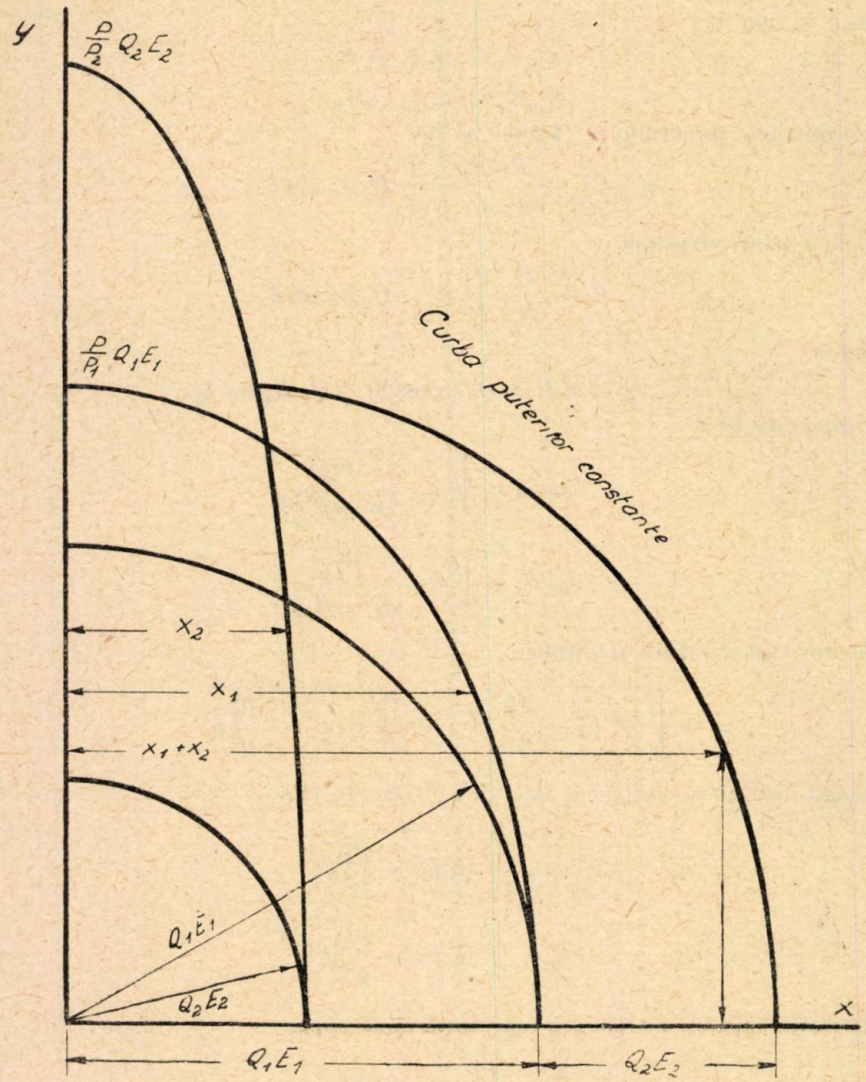

Fig. 18. — Curba puterilor constante.

In cazul când generatorii au același unghi, atunci ecuațiile de mai sus duc la un cerc ca în cazul generatorului echivalent, lucru care a fost verificat mai sus și pe cale directă. Intr'adevăr, în cazul când unghiul este același avem

$$\frac{P}{P_1} = \frac{Q_1 E_1 + Q_2 E_2}{Q_1 E_1} \text{ iar } \frac{P}{P_2} = \frac{Q_1 E_1 + Q_2 E_2}{Q_2 E_2}.$$

În acest caz dacă înlocuim pe $\frac{P}{P_1}$ și $\frac{P}{P_2}$ în expresiile lui x_1 și x_2 avem

$$x_1 + x_2 = x = (Q_1 E_1 + Q_2 E_2)^2 - y^2$$

sau

$$x^2 + y^2 = (Q_1 E_1 + Q_2 E_2)^2$$

deci un cerc cu raza $Q_1 E_1 + Q_2 E_2$ ca și în cazul generatorului echivalent.

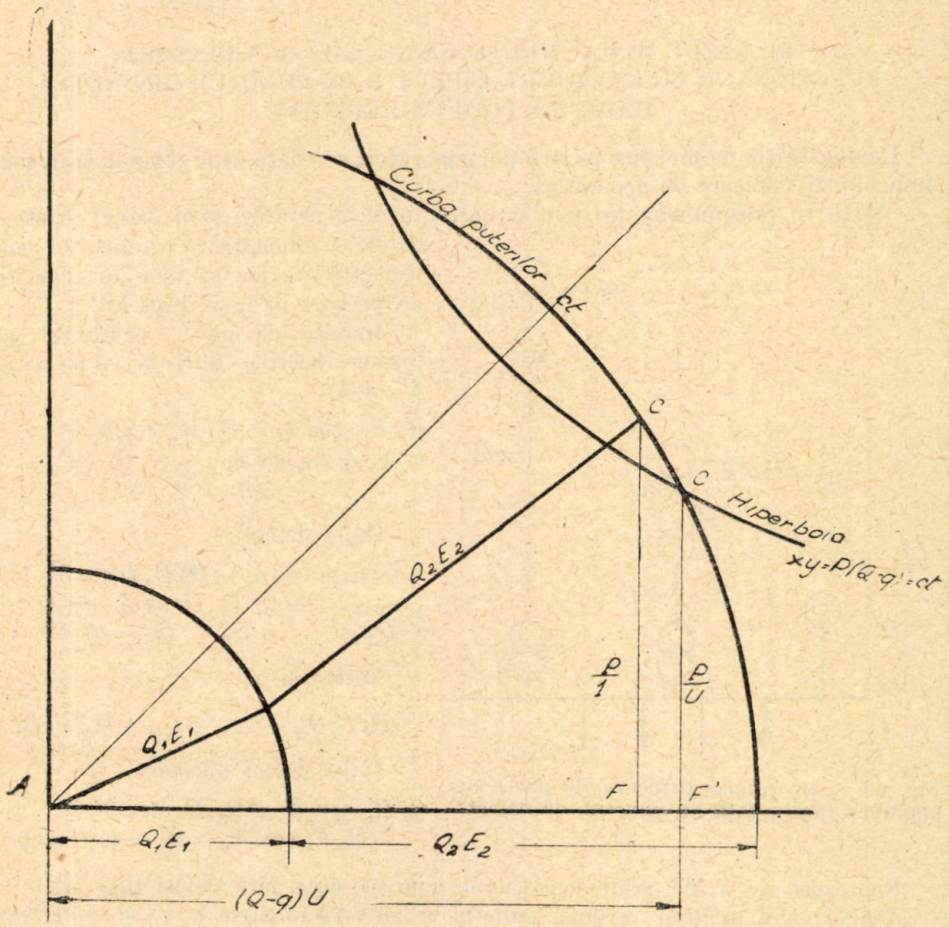

Fig. 19. — Construcția grafică pentru determinarea tensiunii pe secvența directă în cazul a doi generatori cu unghiuri diferite față de punctul de defect.

Din cele de mai sus rezultă o construcție relativ simplă (fig. 18).

Se trasează cele două elipse, apoi din adunarea absciselor $(x_1 + x_2)$ pentru aceeași ordonată se deduce locul punctelor ce satisfac condițiile de repartiție a puterilor. Intersecția acestei curbe cu hiperbola dă noul punct de funcționare (fig. 19).

Vom numi această curbă la care duce adunarea abscisei celor două elipse, curba puterilor constante, căci ea a fost dedusă din condiția ca puterile să rămână aceleași înainte și după defect, pe fiecare generator în parte. Să recapitulăm acum construcția grafică (fig. 19).

Se construește graficul situației fără defect, prin trasarea dreptelor $Q_1 E_1$ și $Q_2 E_2$ care dau pentru tensiunea $U = 1$, cu unghiurile lor respective puterea totală activă P (dreapta CF) și puterea totală reactivă Q (dreapta AF). Se trece apoi la situația cu defect. Se construește hiperbola $x.y = (Q - q)\, P$ și se construește curba puterilor constante care înlocuește vechiul cerc al generatorului echivalent și care trece prin punctul C din momentul inițial, așa cum s'a arătat mai sus. Tensiunea ce rezultă pe secvența directă în unități relative ($U_n = 1$) se măsoară pe figură.

XI. CAZUL A MAI MULTE UZINE SAU GENERATORI, FUNCȚIONÂND CU UNGHIURI DIFERITE PE PUNCTUL DIN REȚEA UNDE S'A PRODUS DEFECTUL

Demonstrația de mai sus pentru doi generatori se poate ușor generaliza în cazul unui număr oarecare de generatori.

Astfel, să presupunem un număr oarecare de generatori (sau uzine) legate la barele ce alimentează o rețea oarecare. Defectul are loc pe una din plecările de pe bara de 6 kV (fig. 20).

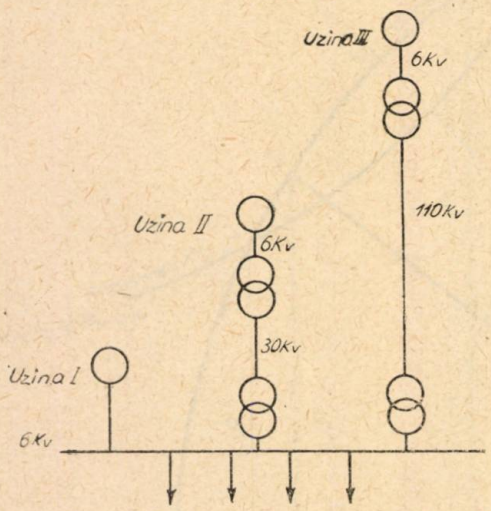

Fig. 20. — Un număr oarecare de uzine cu unghiuri diferite față de punctul de defect.

Inainte de defect, echilibrul puterilor reactive duce la ecuația (cu $U_n = 1$):

$$Q_1 E_1 \cos \delta_1 + Q_2 E_2 \cos \delta_2 + \ldots + Q_n E_n \cos \delta_n \ldots - Q_i - Q_2 \ldots - Q_n - Q_s = 0$$

După defect

$$Q_1 E_1 U \cos \delta_1' + Q_2 E_2 U \cos \delta_2' + \ldots + Q_n E_n U \cos \delta_n' - (Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n + Q_s - q)\, U^2 = 0.$$

Notăm și aci

$$(Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n + Q_s) = Q.$$

După defect obținem

$$Q_1 E_1 \cos \delta_1' + Q_2 E_2 \cos \delta_2' + \ldots + Q_n E_n \cos \delta_n' - (Q - q)\, U = 0.$$

Reprezentăm și aici grafic ecuațiile de mai sus cu și fără defect (fig. 21).

Atunci când unghiul variază, punctul B cu coordonatele $x.y$, se deplasează astfel ca raportul puterilor dintre uzina 1 și totalul puterii să rămână același. In acest caz se poate scrie

$$\frac{y}{Q_1 E_1 \sin \delta_1'} = \frac{\frac{P}{U}}{\frac{P_1}{U}} = \frac{P}{P_1}$$

$$y = QE \sin \delta_1' \cdot \frac{P}{P_1}$$

expresie identică ca și în cazul a doi generatori. Expresii identice se pot scrie pentru fiecare din generatori, adică

$$\frac{y}{Q_2 E_2 \sin \delta_2'} = \frac{P}{P_2} \qquad \frac{}{Q_n E_n \sin \delta_n'} = \frac{P}{P_n}$$

Abscisa este și aici

$$x = Q_1 E_1 \cos \delta_1' + Q_2 E_2 \cos \delta_2' + \ldots + Q_n E_n \cos \delta_n'$$

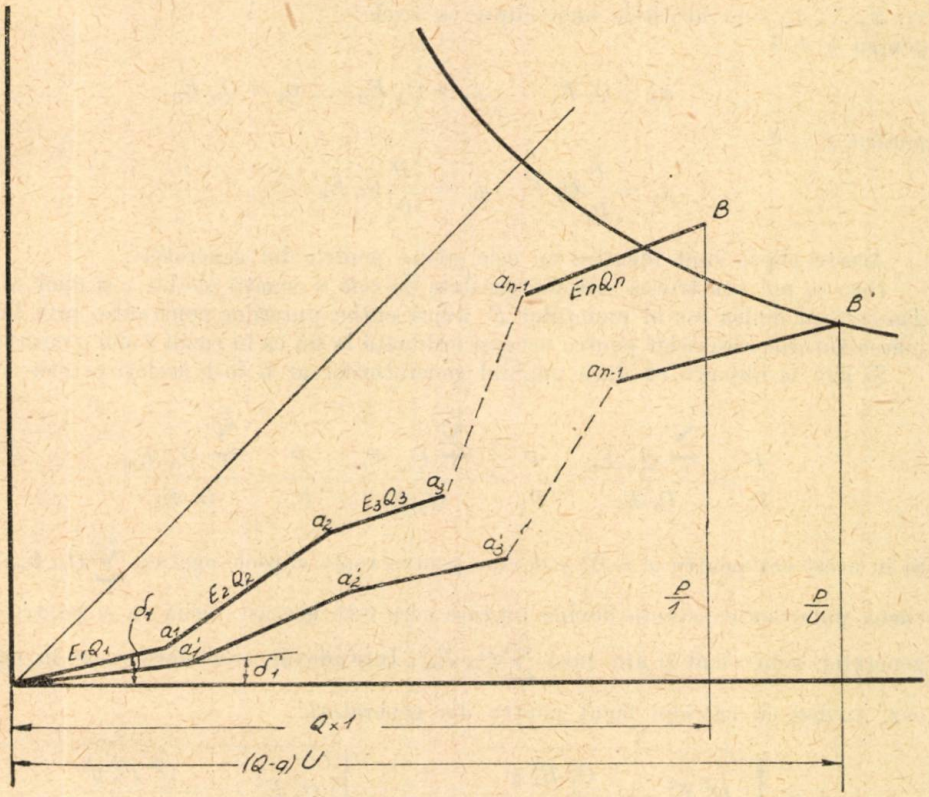

Fig. 21. — Diagrama pentru un număr oarecare de uzine cu unghiuri diferite față de punctul de defect.

Din expresiile lui y înlocuim peste tot pe cos δ_1' cos δ_2' etc. Obținem pentru x

$$x = E_1 Q_1 \sqrt{1 - \frac{P_1^2}{P^2} \frac{y^2}{Q_1^2 E_1^2}} + \ldots + Q_n E_n \sqrt{1 - \frac{P_n^2}{P^2} \frac{y^2}{Q_n^2 E_n^2}}$$

sau

$$x = \sqrt{Q_1^2 E_1^2 - \frac{P_1^2}{P^2} y^2} + \ldots + \sqrt{Q_n^2 E_n^2 - \frac{P_n^2}{P^2} y^2}.$$

Observăm și aici că dacă înlocuim pe x cu o sumă de abscise.

$$x = x_1 + x_2 + \ldots + x_n$$

în care

$$x_1 = \sqrt{Q_1^2 E_1^2 - \frac{P_1}{P} y^2}$$

$$x_2 = \sqrt{Q_2^2 E_2^2 - \frac{P_2}{P} y^2} \text{ etc.}$$

$x_1, x_2 \ldots x_n$ sunt abscisele unor elipse cu axele:
pentru $y = 0$

$$x_1 = Q_1 E_1 \qquad x_2 = Q_2 E_2 \ldots x_n = Q_n E_n$$

pentru $x = 0$

$$y_1 = \frac{P}{P_1} Q_1 E_1 \quad y_n = \frac{P}{P_n} Q_n E_n .$$

Aceste elipse sunt identice cu cele găsite pentru doi generatori.

Deci se pot construi și aici elipsele date de cele n ecuații ale lui x și apoi să se găsească al doilea loc al punctului B, adică curba puterilor constante, prin însumarea tuturor absciselor pentru aceeași ordonată la fel ca în cazul a doi generatori.

Și aici se observă că dacă unghiul generatorilor ar fi fost același atunci

$$\frac{P}{P_1} = \frac{\sum_1^n Q_m E_m}{Q_1 E_1}; \quad \frac{P}{P_2} = \frac{\sum_1^n Q_m E_m}{Q_2 E_2}; \quad \frac{P}{P_n} = \frac{\sum_1^n Q_m E_m}{Q_n E_n}.$$

Și în acest caz pentru $x = 0$, y devine pentru toate elipsele egal cu $\sum_1^n Q_m E_m$, iar curba puterilor constante devine un cerc care este aceeași curbă ca și pentru un generator echivalent și are raza $\sum_1^n Q_m E_m$. Într'adevăr se deduce ușor în acest caz, analog cu calculul făcut pentru doi generatori:

$$x = \sqrt{Q_1^2 E_1^2 - \frac{Q_1^2 E_1^2 y^2}{\left(\sum_1^n Q_m E_m\right)^2}} + \ldots + \sqrt{Q_n^2 E_n^2 - \frac{Q_n^2 E_n^2 y^2}{\left(\sum_1^n Q_m E_m\right)^2}}$$

$$x = (Q_1 E_1 + Q_2 E_2 + \ldots + Q_n E_n) \sqrt{1 - \frac{y^2}{\left(\sum_1^n Q_m E_m\right)^2}}$$

$$x = \sqrt{\left(\sum_1^n Q_m E_m\right)^2 - y^2}$$

sau

$$x^2 + y^2 = \left(\sum_1^n Q_m E_m\right)^2.$$

Rezultă de aici o construcție grafică extrem de simplă pentru aflarea componentei directe, în acest caz relativ complicat. Se construește graficul situației inițiale. Se trasează hiperbola $x.y = P.(Q - q)$. Se trasează curba puterilor constante. La intersecția ei cu hiperbola se găsește noul punct de funcționare, care analitic are o expresie extrem de complicată. Prin măsurarea raportului între cele două ordonate ale punctului inițial și cel nou de funcționare se deduce tensiunea U (fig. 22).

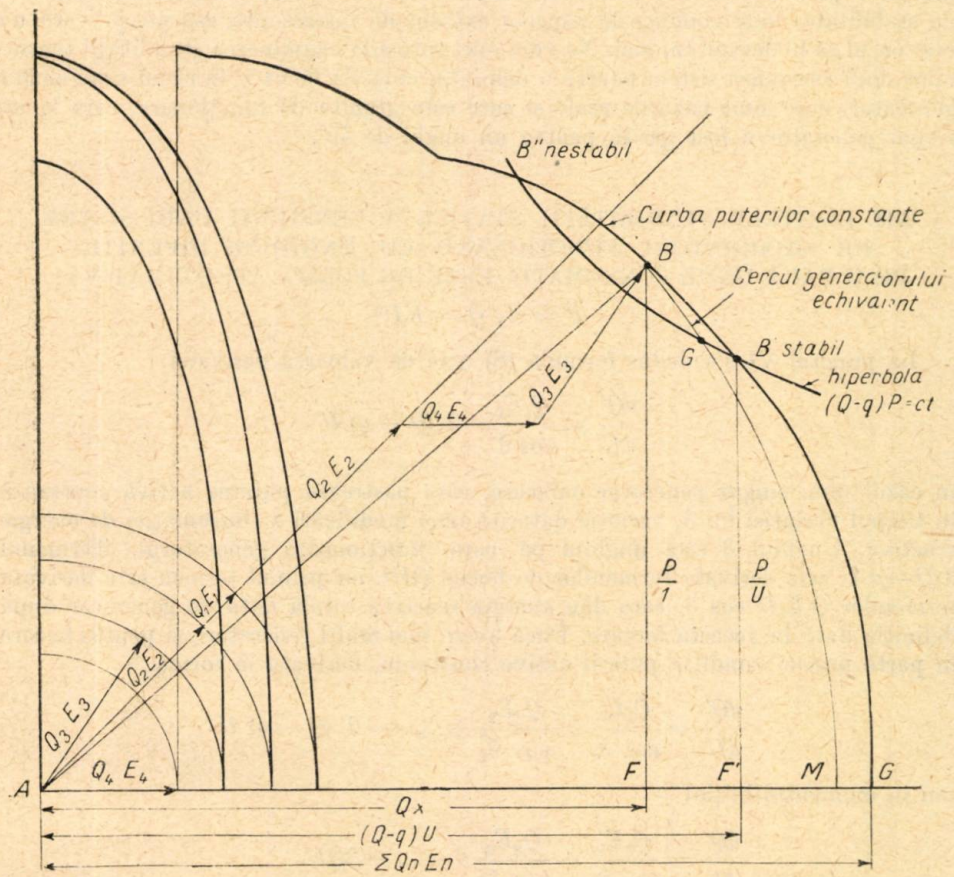

Fig. 22. — Diagrama pentru un număr oarecare de generatori cu unghiuri diferite.

Se observă însă pe diagrama din figura 22 că dacă unghiurile sunt foarte diferite, $\sum_{1}^{n} Q_m E_m$ este mult mai mare decât AM (dat de cercul dus din B al generatorului echivalent), iar pe de altă parte vârfurile elipselor pe axa ordonatelor sunt întotdeauna pe un punct mai înalt decât B, punctul de funcționare inițial, deoarece

$$Q_2 E_2 \frac{P}{P_2} > P \qquad Q_3 E_3 \frac{P}{P_3} > P \text{ etc.} \qquad \text{iar } P = FB$$

Ceea ce înseamnă că linia curbă $B'G$ este continuă cu concavitate în jos. Aceasta arată că această curbă acoperă întotdeauna cercul BM din punctul de funcționare, prin punctul G cu raza egală cu AB.

Se vede din diagrama din figura 22 că în cazul a mai mulți generatori funcționând cu unghiuri diferite față de punctul unde s'a produs defectul *pot fi situații în care sistemul este extrem de sensibil la introducerea bruscă a unei cantități de energie capacitivă*, dacă puterile pe fiecare grup nu variază, așa cum se întâmplă în cazul unei puneri la pământ. Metoda întrebuințată, am încercat s'o aplicăm și la problemele de stabilitate, unde conduce la aspecte extrem de interesante, aspecte pe care nu este cazul să le desvoltăm aici. Ne vom opri totuși la examinarea stabilității tensiunilor unui asemenea sistem pentru a delimita, cum s'a făcut și în cazul unui singur generator, care sunt cazurile reale și care este granița de funcționare, care la un singur generator a fost găsită pentru un unghi de 45°.

XII. LIMITELE STABILITĂȚII STATICE A TENSIUNII UNUI SISTEM DE GENERATORI FUNCȚIONÂND CU UNGHIURI DIFERITE PE O BARĂ UNDE CONSUMAȚIA ESTE DE FORMĂ APROXIMATIVĂ: $P = ct;\ Q = KU^2$

La punctul VI s'a dedus formula (8) care dă valoarea derivatei

$$\frac{dQ'}{dU} = \frac{Q_1 E_1}{\cos \delta} - 2\,(Q - q)\,U$$

în cazul unui singur generator oarecare, care păstrează puterea activă constantă în timpul variației lui δ, variație datorită unei modificări a consumației de energie reactivă. Unghiul δ este unghiul pe care funcționează generatorul. Termenul $2(Q-q)\,U$ este derivata termenilor de forma QU^2, iar primul termen este derivata termenilor $Q_1 E_1 U \cos \delta$, care dau energia reactivă totală dată de generator după definiția dată în această lucrare. Dacă avem mai mulți generatori, și pentru fiecare în parte punem condiția puterii active constante, derivata ia forma

$$\frac{dQ'}{dU} = \frac{Q_1 E_1}{\cos \delta_1'} + \frac{Q_2 E_2}{\cos \delta_2'} + \ldots - 2\,(Q - q)\,U$$

sau în momentul inițial

$$\frac{dQ'}{dU} = \frac{Q_1 E_1}{\cos \delta_1} + \frac{Q_2 E_2}{\cos \delta_2} + \ldots - 2QU.$$

Pentru ca această derivată să fie negativă (condiția de stabilitate a tensiunii împlinite) trebue neapărat ca

$$2QU > \sum_1^n \frac{Q_m E_m}{\cos \delta_m}$$

și

$$2\,(Q - q)\,U > \sum_1^n \frac{Q_m E_m}{\cos \delta_m}.$$

Această expresie se poate evalua grafic cu ușurință (fig. 23).

Termenul $2QU$ este de două ori dreapta AF, iar termenii de forma

$$\frac{Q_1E_1}{\cos \delta_1}$$

sunt subtangentele la cercurile cu raza Q_1E_1, Q_2E_2 etc., măsurate din vârful unghiului respectiv (a_1b_1, a_2b_2 etc.). Se vede dela început că niciunul din unghiuri nu poate fi de 90°, căci atunci una din subtangente devine infinită și derivata trece la o valoare pozitivă (regim instabil). Dar se vede că unele generatoare pot de rândul

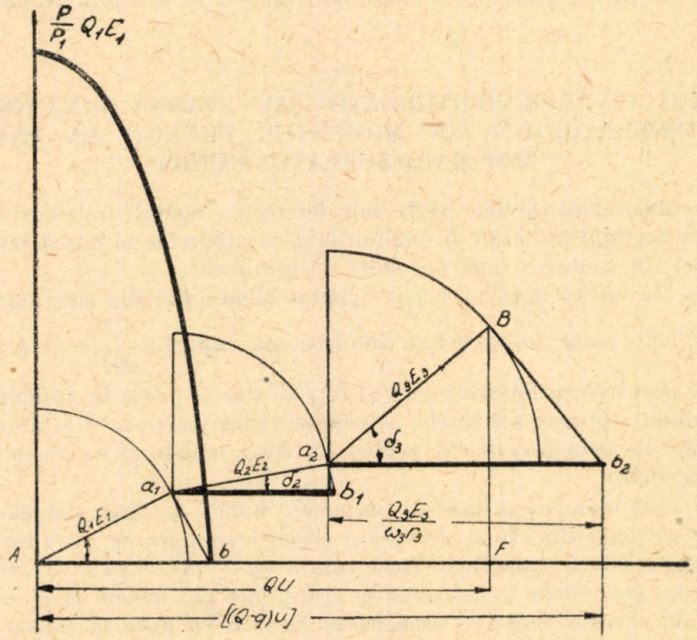

Fig. 23. — Evaluarea derivatei.

acesta să funcționeze și cu unghiuri peste 45° compensate de altele, care ar funcționa în schimb cu unghiuri mai mici de 45°. Se vede, de asemenea, că o limită a funcționării posibile ar fi când toate generatoarele ar avea unghiuri de 45°, deoarece în acest caz suma subtangentelor este egală cu de două ori dreapta AF, adică $2QU = \sum_1^n \frac{Q_m E_m}{\cos \delta_m}$.

Se mai poate afirma că deplasările maxime ale tensiunii par a fi date tocmai de acest caz, când unele generatoare ar funcționa cu unghiuri cât mai mari peste 45°, la limita stabilității, pe când altele cu unghiuri cât mai mici, deoarece în acest caz cele cu unghiuri mari duc la o elipsă (ca mai sus) a cărei înălțime se apropie de punctul de funcționare B, căci ordonata vârfului elipsei

$$\frac{P}{P_1} Q_1E_1 = \frac{P}{Q_1E_1 \sin \delta_1} Q_1E_1 = \frac{P}{\sin \delta_1}$$

va fi cu atât mai aproape de valoarea P, cu cât $\sin \delta_1$ va fi mai aproape de 1.

Deoarece abscisa elipsei se adaugă pentru a da deplasarea punctului B, în cazul când vârful elipsei ar fi chiar pe înălțimea punctului B, deplasarea pentru acest generator e foarte mare, fiind la început chiar orizontală. Acest lucru mai depinde bineînțeles și de mărimea diverșilor generatori, în ceea ce privește deplasarea totală și de poziția pe care o ia hiperbola. In diversele cazuri care se pot întâmpla însă în practică se poate stabili pe acest grafic, care sunt condițiile ce dau maximum de deplasare a tensiunii, în cazul când apare o punere la pământ, fixând ca primă condiție funcționarea pe un punct stabil în momentul inițial.

Din cele de mai sus rezultă drept concluzie pentru cazul generatorului echivalent că se obține în general o valoare mult mai mică a supratensiunii decât cea reală.

XIII. DIVERSE PERTURBAȚII SAU STAREA DINAMICĂ A GENERATORILOR ÎN MOMENTUL PUNERII LA PĂMÂNT POT MĂRI SUPRATENSIUNEA

In momentele când sarcina crește sau descrește, regulatoarele turbinelor acționează pentru reglajul puterilor și unghiurile generatoarelor se mișcă sau chiar pendulează încet, în căutarea unei noi stări de echilibru.

Se poate afirma că dacă nu s'a înregistrat nicio ieșire din sincronism, limitele deplasărilor lente sunt în așa fel ca întotdeauna raportul $\frac{dQ}{dU} = -\varepsilon$ să fie adus la o valoare negativă în fiecare punct al rețelei, dar el poate în anumite momente și pentru anumite puncte ale rețelei să capete valori foarte mici la anumite deplasări de unghi ale generatorilor și pentru un timp mai lung decât constantele de timp ale circuitelor.

Dacă în acel moment și într'un asemenea punct se înregistrează o punere la pământ, pe secvența directă se creează o situație similară cu introducerea bruscă a unei energii reactive capacitive. Deci vom avea $-dQ = \varepsilon\, dU$; se vede că dacă ε e foarte mic, deplasările de tensiune în acel punct pot deveni mari, chiar la cantități mici ale energiei reactive capacitive, ceea ce va duce la ridicarea sensibilă a potențialului celorlalte faze față de pământ în punctul considerat și astfel valorile din calcul pot fi în asemenea situații, practic depășite.

Găsirea punctelor și momentelor periculoase din rețea ar duce la examinări similare ca cele ce se fac la calculul stabilității statice, pe baza criteriului $\frac{dQ}{dU}$ prin construirea curbelor caracteristice statice $Q = f(U)$ și $P = f(U)$.

Până în prezent nu există încă destulă experiență câștigată în acest domeniu și nu este posibil să se determine aceste situații prin formulări generale, ci numai dela caz la caz prin diverse aproximații și astfel să se găsească punctele sensibile în asemenea cazuri pentru o rețea complicată. Din considerațiile făcute mai sus se vede că aceste puncte trebue în special căutate acolo unde curentul de scurt-circuit permanent este mic.

O evaluare a posibilităților maxime ale supratensiunii s'ar putea face construind un grafic similar cu cel de mai sus și deplasând unghiul generatorilor până în punctul unde $\frac{dQ}{dU} = 0$, adică la limita stabilității statice. Acest punct se găsește ușor după cum s'a arătat la punctul XI. Pentru acest punct se determină apoi intersecția hiperbolei cu locul puterilor constante, construcție justificată

numai în cazul când generatorii au deplasări lente, căci numai într'o asemenea situație schimbul de energii reactive se face pe reactanța sincronă. Dar aceasta nu e tot. Pentru o determinare exactă ar mai trebui să se țină seama de curbele $Q = f(U)$ pentru consumatorii reali, care sunt racordați în acel moment la rețea și pentru punctul considerat, iar pentru generatori s'ar putea ține seama de influența variației frecvenței, a saturației etc. Acest lucru destul de laborios ar putea fi necesar numai în cazuri cu totul speciale, când s'ar cere multă precizie, ceea ce nu e cazul în mod obișnuit. Astfel, credem că orientarea aproximativă pe calea indicată aici este suficientă pentru cazurile practice când se cere să se afle la un anumit tip de rețea dacă fenomenul este sau nu posibil, și ordinea lui de mărime.

In anumite cazuri mai simple o asemenea situație limită ar putea fi apreciată destul de simplu și anume: în cazul a n uzine legate direct la bara unde presupunem că s'a produs punerea la pământ, construim graficul de funcționare normală (fig. 24), așa cum s'a făcut mai sus și observăm că limita stabilității statice se află atunci când suma subtangentelor tuturor generatorilor este egală cu $2QU$ (punctul XII).

Construim doi generatori echivalenți (în loc de unul) $Q_{f1}E_{f1}$ și $Q_{f2}E_{f2}$ care dau aceeași energie reactivă totală și aceeași putere activă totală și în plus au aceeași derivată $\frac{dQ}{dU}$ în punctul de defect, ca în situația limitei stabilității statice, unghiul vectorului $Q_{f2}E_{f2}$ fiind luat perpendicular pe dreapta BC care conduce la lungimea $AC = 2QU$.

Ca și în exemplul numeric considerat mai departe se află apoi, tensiunea U prin intersecția hiperbolei $xy = (Q - q)\,P$ cu cercul dus cu raza $Q_{f2}E_{f2}$ a generatorului ce dă putere activă, care determină punctul B'. Apoi $\frac{BF}{B'F'} = U_d$. Punctul B din care s'a plecat era la limita stabilității; în acest caz, $\frac{dQ}{dU} = \varepsilon = 0$, iar punctul B' la care se ajunge este stabil, căci $2\,AF'$ este mai mare decât lungimea AC'. ($2AF$ era egal cu AC'' pentru $\frac{dQ}{dU} = 0$).

Dacă s'ar fi cerut construcția exactă se recurgea la trasarea curbei puterilor constante, prin adunarea ordonatelor elipselor, așa cum s'a arătat mai sus.

In sfârșit, dacă s'ar căuta poziția limită a tensiunii la care se poate ajunge, în ipoteza că nu a intervenit niciun reglaj al excitației la niciun generator, dar au putut interveni schimbări ale repartiției puterilor între generatori, atunci se caută locul intersecției cercului de rază $\sum_1^n Q_m E_m$ cu hiperbola (punctul B'' pe figură). Intr'adevăr, punctul B se poate deplasa în spre dreapta pe diagramă până la limită când toți vectorii generatorilor ($Q_m E_m$) sunt în linie dreaptă *adică generatorii iau toți același unghi față de tensiunea U.*

Observăm că $\sum_1^n Q_m E_m$ adică vectorii generatorilor adunați toți cu același unghi, este chiar punctul de pe abscisă al curbei puterilor constante (însumarea absciselor elipselor pentru $y = 0$), de unde deci se duce un cerc până în punctul B'' la întretăierea cu hiperbola.

Acest punct limită ar reprezenta în realitate o ipoteză cu totul extremă, în care deplasările de unghi ale generatorilor în timpul fenomenului, datorite unei

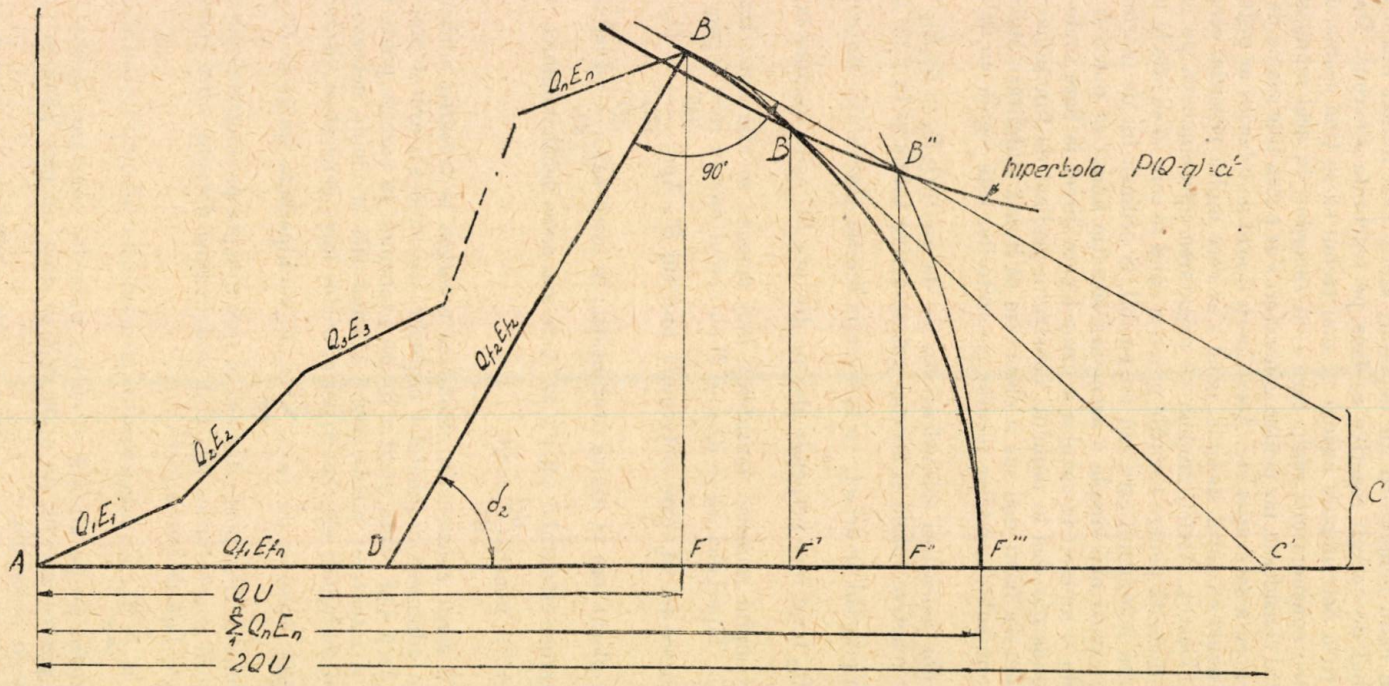

Fig. 24. — Determinarea generatorilor echivalenţi la limita stabilităţii statice.

cauze oarecare (reglaj, variații de putere etc.) îi aduce pe toți la același unghi față de tensiunea punctului de defect. Valoarea tensiunii ce apare pe secvența directă este dată de raportul $U = \frac{BF}{B''F''}$ (fig. 24).

In rețelele reale avem situații complexe, iar aprecierile cantitative ar duce practic de multe ori la calcule extrem de laborioase, atunci când generatorii sunt legați la punctul de defect, prin diverse noduri ce au consumatori de energie activă și reactivă. Situația simplificată considerată, în care generatorii debitează direct pe o bară unde are loc punerea la pământ, poate da însă indicații în majoritatea cazurilor asupra posibilităților fenomenului.

XIV. PUNEREA LA PĂMÂNT A UNEI FAZE CONCOMITENTE CU O DECLANȘARE INTEMPESTIVĂ A UNUI ÎNTRERUPĂTOR POATE ACCENTUA MULT FENOMENUL

Acest caz se prezintă în mod curent mai ales la rețelele aeriene, unde de multe ori în caz de furtună, se înregistrează declanșări intempestive, care scot din circuit *o linie*, ce rămâne nealimentată, în timp ce pe porțiunile rămase în funcțiune se înregistrează mai departe o conturnare de izolator. Funcționarea normală se face mai departe pentru restul rețelei, și în marea majoritate a cazurilor, aceste conturnări, după ce au produs sau nu supratensiuni pe celelalte faze, dispar. O situație similară ar mai putea fi realizată dacă în momentul când un întrerupător declanșează o linie, lucrează un paratoner, pe una din fazele rețelei în porțiunea ce rămâne sub tensiune.

Pentru a aprecia ordinea de mărime a tensiunilor celorlalte două faze, revenim la generatorul unic care conduce la tensiunea pe secvența directă dată de formula (7)

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\delta_1}}{2K_1^2 \cos^2 \delta_1}.$$

Presupunem că după ieșirea unei linii din circuit, puterea totală devine P_2 astfel ca $\frac{P_2}{P_1} = K_2 < 1$. In momentul când puterea s'a micșorat, se înregistrează, bine înțeles, o ușoară variație a frecvenței, iar puterile transmise rotorilor în plus sunt înmagazinate în forța vie a pieselor în mișcare. Indiferent dacă regulatoarele lucrează lent sau rapid, la un moment dat se va stabili o situație după scurgerea termenului tranzitoriu, în care energiile active și reactive sunt schimbate pe reactanța sincronă, iar în spatele ei lucrează aceeași tensiune ca înainte dacă nu a intervenit un reglaj al tensiunii. In acest caz reluând demonstrația făcută la punctul IV toate lucrurile rămân identice până la ecuația (4). In ceea ce privește noul unghi δ_2 pe care îl ia generatorul dedus din menținerea puterii constante îl aflăm punând condiția ca $\frac{P_1}{P_2} = K_2$ ceea ce duce la:

$$\cos \delta_2 = \sqrt{1 - \frac{K_2 \sin^2 \delta_1}{Ud^2}}$$

iar ecuația din care s'a eliminat unghiul δ_2 devine

$$K_1^2 \cos^2 \delta_1 \, U_d^4 - U_d^2 - K_2^2 \sin^2 \delta_1 = 0.$$

Formula (5) care dă valoarea componentei directe a tensiunii de regim permanent în punctul de defect devine

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 K_2^2 \sin^2 2\delta_1}}{2K_1^2 \cos^2 \delta_1} \tag{15}$$

care duce la valori amplificate pentru U_d cu cât K_2 este mai mic ca 1 (punctul XV).

Pericolul pentru asemenea situații trebue considerat în special la linii aeriene cu multe ramificații, după cum am arătat și mai sus, unde perturbațiile atmosferice duc la declanșări intempestive simultane cu conturnări de izolatori, scurgeri prin paratoneri etc. care pot avea ca rezultat trecerea prin situația expusă aici, care poate mări « supratensiunea prelungită ».

XV. EFECTUL REACTORILOR PENTRU REDUCEREA CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ȘI A AMESTECULUI DE CABLURI ȘI LINII AERIENE ÎN ACEEAȘI REȚEA

Am văzut până acum că fenomenul este cu atât mai periculos cu cât șuntul echivalent ce intervine pe secvența directă, în momentul unei puneri la pământ, care este o reactanță negativă ($-x_0$), are valoarea absolută mai mică (sau $q = \frac{1}{x_0}$ valoare mare). Să considerăm o linie aeriană de 15 km cu secțiune mare și rezistență mică. Să presupunem (fig. 27) că ea funcționează cu sarcină neglijabilă alimentată dela o bară unde sunt și alte plecări. Să presupunem că curentul capacitiv al rețelei avea o valoare ce conducea la o reactanță homopolară $x_0 = 70\ \Omega$ (valoare posibilă în rețele reale de 6—30 kV).

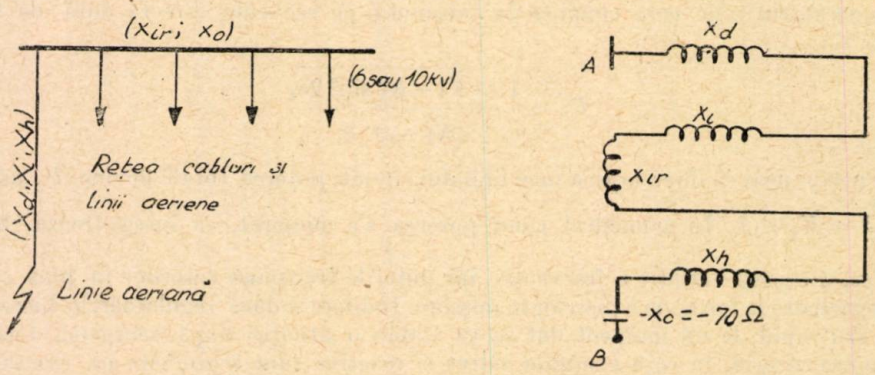

Fig. 25. — Șuntul echivalent al unei linii aeriene care are o punere la pământ pe o bară la capul ei.

In momentul punerii la pământ a unei faze la capul liniei, șuntul echivalent ce intervine pe bară este (fig. 25)

$$-x_s = -70 + x_d + x_i + x_h + x_{ir}.$$

Dacă linia are cca 15 km și e fără fir de gardă, valorile aproximative ale reactanțelor sunt

reactanța directă a liniei $x_d = 6\ \Omega$
reactanța inversă a liniei $x_i = 6\ \Omega$
reactanța homopolară a liniei $x_h = 20\ \Omega$
reactanța inversă a rețelei x_{ir} a cca 3 Ω (apreciat arbitrar).

Noua valoare a șuntului capacitiv devine (reactanța lui):

$$-x_s = -70 + 35 = -35.$$

Se vede că în acest caz particular, șuntul echivalent devine de două ori mai mic ca valoare (dela 70 la 35), iar q de două ori mai mare, ceea ce atrage o amplificare a fenomenului (se micșorează K_1, fig. 12).

In esență, liniile aeriene prin reactanțele lor mari pot duce la o mărire a puterii capacitive ce se introduce pe secvența directă în momentul unei puneri la pământ.

Această situație este în special periculoasă, după cum vom vedea în exemplul de calcul ce urmează, în cazul când rețeaua este amestecată, cabluri și linii aeriene, deoarece în acest caz, din cauza capacității mari a cablurilor, se poate ajunge la diferențe apreciabile ca în cazul numeric arătat mai sus. Este interesant de observat că reactorii ce se așează pe plecări pentru reducerea curenților de scurtcircuit au o influență similară și ei pot duce, în anumite cazuri, la amplificarea fenomenului.

A. Exemple de calcul cu mai multe uzine pentru aprecierea situațiilor, când pot apare supratensiuni prelungite în cazul unei puneri la pământ într'o rețea de 6 kV

Să considerăm o rețea de tipul celei din figura 26, *a* alimentată de două surse, una din ele hidraulică, la o distanță de 120 km, iar a doua locală.

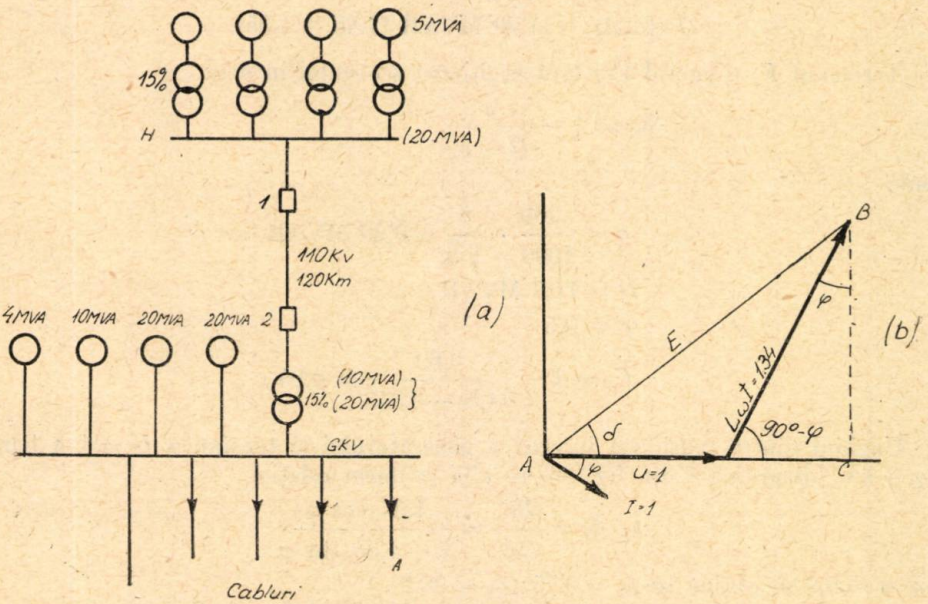

Fig. 26. — *a*. Rețea complexă de 6 kV, cabluri și linii aeriene, alimentată de o sursă locală (4—80 MVA) și o sursă exterioară, centrală hidraulică.
b. Diagrame pentru aflarea unghiurilor generatorului.

Rețeaua de 6 kV e cu neutrul izolat și a atins un curent capacitiv la pământ total de cca 200 A. Să considerăm diferite ipoteze, în ceea ce privește sarcinile și generatorii și să căutăm posibilitățile fenomenului în aceste diverse cazuri.

CAZUL I

Funcționarea cu o sarcină mică (noaptea sau în zi de sărbătoare). Uzina exterioară hidraulică singură în funcțiune

a) Scurtcircuit pe bare de 6 kV.

— Sarcina totală 10 MVA cu $\cos \varphi = 0{,}9$.

La uzina hidraulică, numai două grupuri în funcțiune la plină sarcină.

Luăm ca putere de bază 10 MVA. Reactanța totală a generatorului echivalent până la bara de 6 kV.

Reactanța sincronă a generatorilor în plină sarcină	1
Reactanța transformatorilor ridicători	0,15
Reactanța liniei (0,4 Ω/km, 120 km) $0{,}4 \cdot 120 \frac{10}{110^2}$	0,04
Reactanța transformatorilor coborîtori	0,15
Reactanța totală generatori	1,34

Puterea reactivă a sarcinei:

$$Q_s = 10 \sqrt{1 - 0{,}9^2} = 4{,}35 \text{ MVAR.}$$

Puterea reactivă consumată de reactanța generatorului echivalent

$$Q_1 = \frac{10}{1{,}34} = 7{,}45 \text{ MVAR}$$

$$Q \text{ (total)} = 11{,}80 \text{ MVAR } (7{,}45 + 4{,}35).$$

Termenul K_1 (punctul IV) fără neglijarea secvenței inverse

$$K_1 = 1 - \frac{q}{Q - pq}$$

unde

$$q = \frac{200}{1000} \cdot \frac{6}{\sqrt{3}} = 0{,}69 \text{ MVAR}$$

$$Q = 11{,}8 \text{ MVAR}$$

$$p = 0{,}5$$

$$K_1 = 1 - \frac{0{,}69}{11{,}8 - 0{,}345} = 0{,}94.$$

Unghiul dintre tensiunea internă a generatorului și tensiunea $U = 1$ a barei de 6 kV (diagrama *b* din fig. 26) se află conform relației

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{BC}{CA} = \frac{1{,}34 \cos \varphi}{1 + 1{,}34 \sin \varphi}$$

$\cos \varphi = 0{,}9$ se obține $\operatorname{tg} \delta_1 = 0{,}75$; $\delta_1 = 36{,}9°$.

Acum avem toate valorile necesare calculului. Se deduce valoarea componentei directe în caz de scurtcircuit la pământ pe una din fazele rețelei de 6 kV (pe bara de 6 kV) din formula (7) punctul VI.

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0{,}94^2 \sin 73{,}8°}}{2\,(0{,}94 \cdot \cos 36{,}9)^2}$$

$$U_d = 1{,}14; \qquad U_1 = 0{,}5 \cdot 0{,}14 = 0{,}07 \quad U_h = 1{,}21.$$

Tensiunea fazelor sănătoase la pământ

$$\overline{E}_p = 1{,}21 - a^2\ 1{,}14 - a\ 0{,}7 = 1{,}85 + j\ 0{,}93.$$

$$E_p \text{ modul} = 2{,}04$$

b) Scurtcircuit la capul unei linii aeriene de cca 10 km. Șuntul echivalent pe bara de 6 kV se schimbă în acest caz datorită reactanțelor liniei.

Reactanța directă a liniei $0{,}4 \cdot 10$ . . . . . 4 Ω
Reactanța inversă . . . . . 4 Ω
Reactanța homopolară (linia fără fir de gardă) . . 14 Ω

Reactanța inversă a rețelei $\left(\frac{U^2}{x_i} = \frac{Q}{p}\right)$

$$x_i = \frac{pU^2}{Q} = \frac{0{,}5 \cdot 6^2}{11{,}8} = \frac{18}{11{,}8} = 1{,}53\ \Omega.$$

Reactanța negativă homopolară pe bara de 6 kV

$$-x_0 = -\frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3}{200} = -52\ \Omega.$$

Reactanța totală a șuntului echivalent pe bara de 6 kV

$$x_s = -52 + 4 + 4 + 14 + 1{,}53 = -28{,}47.$$

Puterea reactivă a șuntului echivalent pentru tensiunea $U = 6$ kV.

$$-q_s = \frac{-6^2}{28{,}47} = -1{,}27 \text{ MVAR}.$$

De unde deducem

$$K_1 = 1 - \frac{1{,}27}{11{,}8} = 1 - 0{,}108 = 0{,}892.$$

Inițial, generatorul a funcționat cu același unghi ca și în cazul *a*, deci componenta directă

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0{,}892^2 \sin^2 73{,}8^\circ}}{2\,(0{,}892 \cdot \cos\ 36{,}9^\circ)^2}.$$

$$U_d = 1{,}23; \qquad U_i = 0{,}23 \cdot 0{,}5 = 0{,}115 \quad U_h = 1{,}345.$$

Tensiunea fazelor sănătoase pe bara de 6 kV

$$\overline{E}_p = 1{,}345 - a^2\ 1{,}23 - a\ 0{,}115 = 2{,}02 + j\ 0{,}966.$$

$$\overline{E}_p \text{ modul} = 2{,}25.$$

Se obține deci pe bară supratensiune mai mare decât în cazul scurtcircuitului chiar pe această bară unde E_p era 2,04.

c) Scurtcircuit la capul liniei aeriene simultan cu o declanșare intempestivă undeva în rețeaua de 6 kV.

Această situație poate avea loc dacă presupunem că se funcționa deja în rețeaua de 6 kV cu o punere la pământ. In timpul acesta apare o conturnare de izolator la linia aeriană. In acest caz, cablul care avea un defect de punere la pământ, pre-

supus pe altă fază decât conturnarea, va fi traversat de un curent mare pe faza respectivă (scurtcircuit două faze pământ), ceea ce poate provoca declanșarea întrerupătorului respectiv.

Arcul continuând să fie întreținut pe linia aeriană, să admitem că variația puterii totale după eliminarea cablului ce a avut defect este de 10% din totalul puterii, deci $K_2 = 0\,9$ (punctul XIV).

In acest caz, componenta directă a tensiunii, pe bare, a fazelor sănătoase, devine (punctul XIV, formula (15).

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 K_2^2 \sin^2 2\,\delta_1}}{2K_1^2 \cdot \cos^2 \delta_1}$$

sau

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0{,}9^2 \cdot 0{,}892^2 \cdot 0{,}96^2}}{2\,(0{,}892 . 0{,}798)^2}$$

$$U_d = 1{,}29 \qquad U_i = 0{,}29 \cdot 0{,}5 = 0{,}145 \qquad U_h = 1{,}435$$

Tensiunea fazelor sănătoase față de pământ

$$\overline{E}_p = 1{,}435 - a^2\ 1{,}29 - a\ 0{,}145 = 2{,}15 + j\ 0{,}99$$

$$E_p \text{ modul} = 2{,}36.$$

Același caz de defect pe o plecare puternică și cu o variație de putere activă de 20% duce la formula

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0{,}8^2 \cdot 0{,}892^2 \cdot 0{,}96^2}}{2\,(0{,}892 \cdot 0{,}798)^2}$$

$$U_d = 1{,}32 \qquad U_i = 0{,}32 \cdot 0{,}5 = 0{,}16 \qquad U_h = 1{,}48.$$

Tensiunea fazelor sănătoase față de pământ

$$\overline{E}_p = 1{,}48 - a^2\ 1{,}32 - a\ 0{,}16 = 2{,}22 + j\ 1.$$

$$E_p \text{ modul} = 2{,}44.$$

Dacă se consideră că declanșarea a eliminat și o parte din energia reactivă, atunci aceste valori cresc și mai mult (se micșorează K_1, fig. 12).

In rezumat, într'un asemenea moment de funcționare a rețelei o punere la pământ pe una din faze, într'un punct oarecare al rețelei poate produce o supratensiune prelungită egală cu 2—3 E pe celelalte două faze sănătoase.

CAZUL II

Funcționarea cu aceeași sarcină ca mai sus și cu un grup de 10 MVA în funcțiune în uzina termică

Presupunem o reactanță sincronă a grupului termic (descărcat) de 150%.

Alternativa întâia de funcționare. Generatorii astfel încărcați ca unghiul tensiunilor interne față de bară să fie același. Luând la fel ca mai sus tensiunea $U = 1$ (6 kV) în momentul inițial, avem:

— puterea reactivă Q_1 (a generatorului 1) = 7,45 MVA (generatorii hidraulici, aceiași ca mai sus — pentru 10 MVA putere nominală).

— puterea reactivă Q_2 (a generatorului 2) $= \frac{10}{1,5} = 6,65$ MVA. Reactanța internă s'a considerat deci 150% pentru turboalternatorul respectiv. Puterea reactivă a sarcinii $Q_s = 4,35$ MVA.

$$Q = 4,35 + 6,65 + 7,45 = 18,45 \text{ MVA.}$$

Această putere o considerăm ca putere de bază, ceea ce simplifică calculele.

In acest caz

$$Q = 1$$

iar puterea activă totală este în unități relative

$$P = \frac{10 \cdot 0,9}{18,45} = 0,485.$$

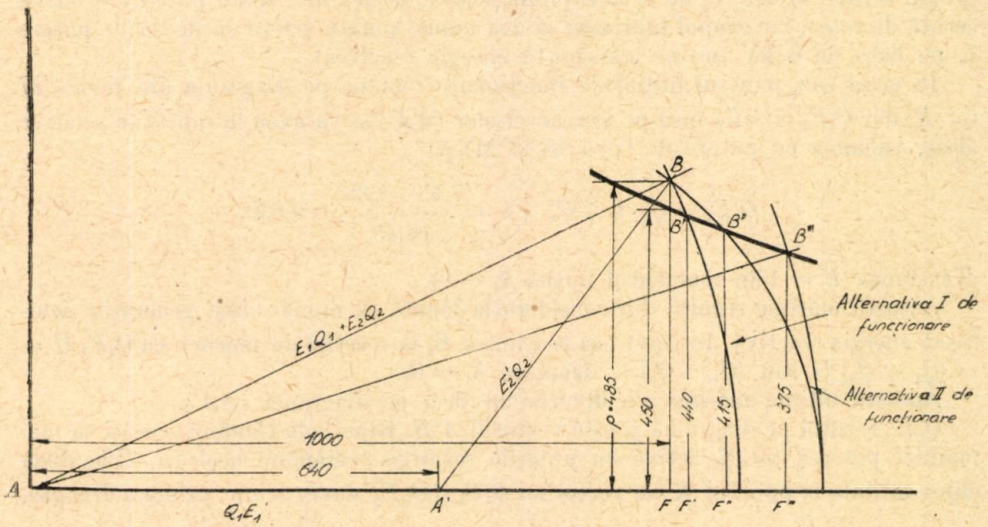

Fig. 27. — Graficul de calcul pentru doi generatori, unul depărtat, iar al doilea legat direct la rețeaua de 6 kV.

Diagrama pentru momentul inițial se deduce foarte simplu construind punctul de funcționare B cu abscisă 1 și ordonată 0,485 (fig. 27) după metoda expusă la punctul X.

Punctul de funcționare nou în cazul unei puneri la pământ se va găsi pe cercul dus prin acest punct B și hiperbola $x \cdot y = (Q - q)\, P$.

In cazul unei puneri la pământ pe linia aeriană de 6 kV, cu unitățile alese (șuntul echivalent 1,27 MVA, vezi mai sus).

$$x \cdot y = \left(1 - \frac{1,27}{18,45}\right) 0,485 = 0,932 \cdot 0,485 = 0,45.$$

Observăm că $\left(1 - \frac{1,27}{18,45}\right)$ este vechiul raport K_1 ce intervine în cazul generatorului unic, iar hiperbola este deci $x \cdot y = K_1 P$. Noul punct după punerea la

pământ se va găsi în B', iar valoarea U_d a componentei directe a tensiunii va fi

$$U_d = \frac{BF}{B'F'} = \frac{485}{440} = 1{,}1$$

$$U_i = 0{,}1 \cdot 0{,}5 = 0{,}05 \quad U_h = 1{,}15$$

Tensiunea față de pământ a fazelor sănătoase

$$\overline{E}_p = 1{,}15 - a^2\ 1{,}1 = 0{,}05 = 1{,}73 + j\ 0{,}91.$$

Rezultă modulul

$$E_p = 1{,}95.$$

Alternativa a doua de funcționare. Aceeași sarcină, însă unghiul generatorilor diferiți. Presupunem că pentru a se obține o economie maximă se aranjează ca grupul termic să dea o putere neglijabilă activă, să dea însă toată puterea reactivă cerută de rețea, iar grupul hidraulic să dea numai putere activă cu factor de putere 1, pe bara de 6 kV (nu se transportă energie reactivă).

In acest caz, punctul inițial de funcționare rămâne pe diagrama din figura 27 tot B, dar Q_1E_1' se află însă pe axa absciselor (AA') și va avea în unitățile relative alese, valoarea cu putere de bază 18,45 MVA

$$Q_1E_1' = Q_1 \cdot 1 + Q_s \cdot 1 = \frac{7{,}45 + 4{,}35}{18{,}45} = 0{,}640$$

(Tensiunea $U = 1$ în momentul inițial $\delta_1 = 0$).

Această mărime rezultă din considerația făcută că numai acest generator debitează energie reactivă. In acest caz tensiunea E_1 ia o astfel de mărime ca $Q_1E_1'\ U = (Q_1 + Q_s)\ U$ sau $(Q_1 + Q_s)\ 1$, deoarece $\delta_1 = 0$.

Această ultimă mărime s'a determinat deci pe diagramă (AA').

Q_2E_2 rezultă pe diagramă și este vectorul $A'B$. Hiperbola rămâne aceeași ca mai înainte, puterea totală activă cu puterile reactive rămânând aceleași. Cele două elipse arătate la punctul X ale vectorilor Q_1E_1' și Q_2E_2' devin acum: prima o dreaptă, căci raportul $\frac{P}{P_1} = \infty$ (axa de pe ordonate a elipsei), iar a doua un cerc, căci $\frac{P}{P_2} = 1$.

Astfel, al doilea loc al punctului B se află acum pe cercul cu rază Q_2E_2, dus din punctul A', iar intersecția acestui cerc cu hiperbola dă punctul nou de funcționare B''.

Astfel, în această a doua ipoteză de funcționare rezultă o valoare a componentei directe pe bară de

$$U_d = \frac{BF}{B''F''} = \frac{485}{415} = 1{,}17 \quad U_i = 0{,}085 \quad U_h = 1{,}255$$

$$\overline{E}_p = 1{,}255 - a^2\ 1{,}17 - a\ 0{,}085 = 1{,}89 + j\ 0{,}94$$

$$E_p \text{ modul} = 2{,}11.$$

Din acest exemplu de calcul în cele două alternative de funcționare *se vede clar influența unghiului diferit al generatorilor și ridicarea sensibilă a tensiunii la care*

pot conduce distanțele diferite (electrice) ale generatorilor față de punctul de defect, sau stări de încărcare foarte diferite ale generatorilor.

Mai observăm că dacă se lucrează cu generator echivalent atât alternativa întâia cât și alternativa a doua de funcționare conduc la rezultate identice și se vede din acest exemplu ordinea de mărime a erorilor ce se pot face.

In sfârșit, în același caz cu două uzine, dacă am presupune că punerea la pământ a intervenit în timpul unor perturbații sau reglaje de sarcini, care puteau deplasa unghiurile generatorilor și repartiția sarcinilor și am dori să cunoaștem care e situația limită cea mai defavorabilă, tragem un cerc cu raza totală $E'_1Q_1 + E'_2Q_2$ care întâlnește hiperbola în punctul B''', iar componenta directă a tensiunii ne e dată în acest caz de raportul $\frac{BF}{B'''F'''} = \frac{485}{375} = 1{,}26$, ceea ce ar conduce la o tensiune față de pământ a fazelor sănătoase de

$$U_d = 1{,}26 \quad U_i = 0{,}5.0{,}26 = 0{,}13 \quad U_h = 1{,}39$$

$$\bar{E}_p = 1{,}39 - a^2\ 1{,}26 - a.0{,}13 = 2{,}1 + j\ 0{,}98$$

$$E_p \text{ modul} = 2{,}4\ E.$$

B. O linie de transport cu alimentare din două capete

Examinarea acestui caz completează calculul făcut la punctul VIII și e de natură să ilustreze un caz observat pe o rețea reală de 110 kV, unde se verifică concluziile teoretice ale acestui studiu.

Să considerăm linia de 110 kV din figura 26, *a* și să presupunem deocamdată că instalația de 110 kV e cu neutrul izolat. Să considerăm cazul în care atât centrala hidraulică, cât și cea termică au caracteristici identice cu cele două cazuri dela punctul VIII, în plină sarcină (*A* și *B*) și anume:

centrala hidraulică 1, în plină sarcină: 20 MVA cos $\varphi = 0{,}8$,
centrala termică 2, în plină sarcină: 40 MVA cos $\varphi = 0{,}8$.

Consumația (fig. 28, *a*) este toată pe bara de 6 kVA a centralei termice 2, centrala 1 debitând către centrala 2 cei 20 MVA pe care îi produce.

Să vedem ce se întâmplă într'o asemenea situație, când dintr'un motiv oarecare a declanșat unul din întrerupătorii liniei 1 sau 2, linia rămânând sub tensiune în gol și având în acel moment un arc la pământ pe un izolator de 110 kV. Se știe că asemenea cazuri pot avea loc în exploatare, mai ales în cazuri de perturbații atmosferice.

Să presupunem că declanșează întrerupătorul 2, linia rămânând mai departe legată la uzina 1. Se știe că o asemenea situație e periculoasă și fără arcul la pământ, deoarece descărcarea bruscă de sarcină a uzinei 1 duce la ambalarea rotorului, și la supratensiuni însemnate. Un calcul nu este necesar în acest caz, pentru a se afirma că se naște în cazul arcului la pământ o supratensiune E_p a fazelor sănătoase, incomparabil mai mare ca cea determinată în cazurile *A* și *B*. Această supratensiune e cu atât mai mare cu cât sarcina ce circulă dela 1 la 2 este mai mare. Cea mai mică valoare a ei o obținem în cazul *A* (*a*) în gol, (dela punctul VIII), care e similar cu cazul în care puterea ce circulă pe linie e zero, în momentul când taie întrerupătorul.

Deci în cazul când taie întrerupătorul 2, tensiunea fazelor sănătoase față de pământ poate lua valoarea

$$E_p \geqslant 3\,E_n \text{ (cazul } A\text{, punctul VIII: uzina în gol)}$$

și este cu atât mai mare cu cât sarcina a fost mai mare.

Să presupunem acum că taie întrerupătorul 1 al uzinei hidraulice, linia rămânând în gol legată însă la uzina termică de 40 MVA, care preia în acel moment și sarcina uzinei 1. Unghiul uzinei 1, pe bara de 6 kV și deci și pe cea de 110 kV (transformatorul fiind în gol), rămâne cel calculat în cazul B 28,5° care presupune aceeași sarcină activă și reactivă a acestei uzine. In schimb puterea activă ce se cere uzinei devine

$$P_2 = (40 \text{ MVA} + 20 \text{ MVA}).0{,}8$$

iar cea reactivă

$$Q_2 = (40 \text{ MVA} + 20 \text{ MVA}).0{,}6.$$

Situația e similară cu cea determinată în exemplul dela B, punctul VIII, în care am încărca brusc generatorul cu surplusul de energie activă și reactivă ce intervine la tăierea liniei.

In acest caz este evident că tensiunea componentei directe scade, iar tensiunea fazelor sănătoase față de pământ scade sub 1,73 E_n.

Se poate aprecia și cu ajutorul formulei (15) introducând unghiul generatorului (termenul K_2) de variația puterii active care aici e mai mare ca 1 și termenul $K_1 = 1 - \frac{q}{Q}$ care, de asemenea e mai mare ca 1, căci q e pozitiv.

Este evident că în acest caz intervin reglaje ale aburului și ale tensiunii. Ridicarea tensiunii va fi cu atât mai mică, cu cât puterea transportată pe linie e mai mică. In cazul extrem când această putere e zero, suntem chiar în cazul calculat la B, punctul VIII, care duce la supratensiunea $E_p = 2$.

Deci în cazul când taie întrerupătorul 1, dacă mai rămâne o punere la pământ pe linie, tensiunea fazelor sănătoase poate fi

$$E_p \leqslant 2\,E_n$$

față de

$$E_p \geqslant 3\,E_n$$

în cazul tăierii întrerupătorului 2. In concluzie:

a) Este pericol atunci când taie întrerupătorul 2 și linia rămâne cu neutrul izolat alimentată de uzina 1 ($E_p \geqslant 3\,E_n$).

b) Nu este pericol în general, atunci când linia este în sarcină, dacă taie întrerupătorul 1 și linia rămâne legată la uzina mare, cu neutrul izolat, chiar dacă sarcina ar fi mică ($E_p \leqslant 2\,E_n$).

Există totuși un oarecare pericol în cazul când pe timp de furtună s'ar ține linia legată în gol la centrala 2, cu întrerupătorul 1 deschis, pericol relativ redus, tensiunea E_p fiind în caz de arc la pământ de cca $2\,E_n$, conform calculului făcut anterior la punctul VIII.

Se vede din cele de mai sus că următoarele măsuri sunt suficiente pentru a asigura o securitate completă:

1. Punerea la pământ a neutrului în dreptul uzinei hidraulice. Astfel, oridecâteori taie întrerupătorul 2, linia care rămâne sub tensiune are neutrul pus la pământ și șuntul nu mai e capacitiv în caz de punere la pământ a unei faze, ci inductiv, ceea ce conduce la $E_p \leqslant 1{,}73\,E_n$. Se elimină astfel complet cazurile în care $E_p \geqslant 3E_n$.

2. Se lasă mai departe neutrul izolat, în dreptul uzinei termice, cu precauțiunea în exploatare de a se pune linia în funcțiune dela centrala hidraulică, prin închiderea întrerupătorului 1. Se elimină astfel cazurile $E_p = 2\,E_n$.

Acest tip de instalație cu măsurile indicate aici a funcționat fără inconvenient timp de 20 de ani, neutrul fiind pus la pământ numai în dreptul uzinei hidraulice mici și lăsat izolat în dreptul uzinei termice de putere mare. Vedem că această situație își găsește și o bază teoretică.

XVI. VERIFICAREA OBSERVAȚIILOR DIN TRECUT ASUPRA REȚELELOR PRIN TEORIA DE MAI SUS

Vom expune pe rând caracteristicele fenomenului, așa cum a fost observat până în prezent:

a) Ordinea de mărime a supratensiunii prelungite pe fazele sănătoase este de 1,73 — 3,5 E_n (tensiunea simplă) în cazurile curente și rarcori se constată depășiri ale acestei cifre fără să se fi putut stabili o limită. Valorile mari intervin la rețelele de înaltă tensiune (peste 60 kV) unde în prezent, din această cauză neutrul se tratează întotdeauna.

Intr'adevăr, după cum s'a văzut și în exemplele luate, ordinea de mărime este aceasta la caracteristicile curente ale rețelelor. Teoretic ea poate fi cuprinsă între 1,73 (la puteri mici homopolare) și până la valori foarte mari care apar posibile din calcul, în special la rețelele aeriene de transport de înaltă tensiune (q mare, K_1 mic, diagrama din figura 12).

b) Supratensiunea prelungită socotită periculoasă cu valori între 2—3,5 E apare numai dacă curenții capacitivi depășesc o anumită valoare. In diversele țări se dau diverse valori ale acestor curenți la diverse tensiuni, conform observațiilor din practică, fără a se fi putut stabili un criteriu precis din lipsa explicației teoretice a fenomenului.

Intr'adevăr din formulele stabilite se vede că fenomenul apare dela o anumită putere homopolară capacitivă în sus și că este cu atât mai puternic, cu cât această putere este mai mare (dacă q mare, K_1 din formule mic, diagrama figura 12).

c) Natura fenomenului observat în trecut numit « supratensiunea prelungită » este un fenomen cu caracter de durată. El duce în practică la accidente tocmai din cauza acestei durate, cu toate că valoarea supratensiunii este de multe ori relativ mică, depășind cu puțin tensiunea simplă.

In explicația dată aici s'a căutat fenomenul de durată, considerându-se schimbul de puteri reactive pe reactanțele sincrone ale generatorilor, în regim permanent. Acest schimb poate avea loc numai într'un regim, care a căpătat o oarecare permanență.

d) Fenomenul observat generează pe o mare întindere a rețelei, supratensiunea observată a fazelor sănătoase la pământ.

Din explicația prezentată rezultă ridicarea potențialului homopolar în punctul de defect, ceea ce bineînțeles atrage ridicarea potențialului pe celelalte două faze pe o mare întindere a rețelei legată galvanic cu punctul considerat.

e) La experiențele făcute pe viu în trecut (2) nu s'a observat nicio intermitență a curentului ce se scurge la pământ, care la oscilograf apărea sinusoidal. De asemenea s'a observat că supratensiunea se producea cu o constantă de timp.

Aceste fapte concordă complet cu explicația dată:

— curentul trebue să aibe o caracteristică obișnuită (intermitența ar fi verificat teoria arcului intermitent și pentru aceasta a fost căutată),

— supratensiunea datorită reactanței de regim permanent se stabilește evident cu o constantă de timp.

f) Nu s'a putut stabili până astăzi o cifră precisă a apariției fenomenului în funcție de capacitatea homopolară a rețelei, (curentul capacitiv la pământ) cu toate numeroasele cercetări și experiențe făcute.

Cercetările erau prost îndrumate, deoarece fenomenul așa cum este explicat aici, depinde și de numeroși alți parametri, care erau complet ignorați, căci nu intervin în niciun fel în explicația ce se dăduse fenomenului în funcție numai de mărimea capacității rețelei. Am văzut că el depinde și de:

— puterea totală inductivă a circuitelor pe secvența directă (puterea minimă de scurtcircuit de durată în punctul considerat, adică Q din formulă).

— unghiul generatorului, sau al generatorilor.

— caracteristica sarcinii,

— locul defectului.

g) Nu s'a putut stabili până astăzi pentruce, la același curent capacitiv la pământ (și aceeași tensiune) în unele rețele fenomenul apare și în altele nu. De asemenea, pentruce la aceeași rețea câteodată apare, iar alteori nu.

Din explicația dată aici, aceste împrejurări apar cu o mare claritate.

In aceeași rețea, lucrurile depind de numărul generatorilor ce se găsesc în funcțiune, încărcarea lor activă și reactivă și natura consumației în momentul defectului la pământ.

In rețelele, în care supratensiunea prelungită apare foarte rar se poate trage concluzia, că împrejurările obișnuite de funcționare duc la supratensiuni neglijabile și este necesară o coincidență în plus cu un alt fenomen (considerațiile făcute la punctele XIII și XIV), care să ducă în punctul unde are loc defectul la o deplasare a tensiunii, în momentul introducerii șuntului capacitiv pe secvența directă (declanșări intempestive, reglaje de sarcini la generatori etc.).

Exemplele cele mai convingătoare pentru noi au fost situațiile reale observate și verificările ce s'au făcut prin calcul pentru rețelele respective, pentru verificarea acestui studiu. Calculele de verificare duc în general la apariția supratensiunii prelungite aproape fără excepție pentru rețelele cu tensiuni peste 60 kV. Am reținut aici două exemple, un minimum pentru înțelegerea textului, (punctele VIII și XV).

Rețeaua de 6 kV dela punctul XV, A, la început era alimentată de o uzină termică slabă, (cea considerată de 40 MVA în calcul avea mai puțin) și de uzina hidraulică care funcționa cu 2—3 sau 4 generatori de 5000 kVA, după disponibilul de apă. Acum aproximativ 20 de ani această rețea cerea noaptea 6—10 MVA, care erau asigurați de două grupuri hidraulice singure, sau cu încă un grup de 4—10 MVA în centrala termică. Ziua se punea în funcțiune până la 10—30 MVA în aceeași centrală. Curenții capacitivi ai rețelei treceau de 150 A.

Pe vremea aceea s'au produs noaptea în orele goale ale rețelei defecte multiple, datorite supratensiunii prelungite ce apărea în caz de punere la pământ a unei faze, cu perforarea izolantului în rețeaua de cabluri (la mufe sau pe cablu).

Dacă se urmărește calculul făcut și se micșorează puterile generatorilor și consumația de putere reactivă așa cum a fost situația în vremea aceea în orele de noapte se observă că supratensiunea se mărește în proporție și mai mare. Aceste defecte aveau loc fără excepție noaptea când sarcinile erau mici și grupurile în funcțiune puține: aceste momente conduc și din calcul la maximum de supratensiune (K_1 mic, curba din figura 12).

Intre timp uzina termică a fost amplificată mult (80 MVA), iar sarcinile au crescut.

Statistica arată că în ultimii ani nu au mai avut loc asemenea defecte în caz de punere la pământ. Calculul duce la același rezultat dacă se mărește puterea genera-

torului considerat în uzina termică și a sarcinii așa cum este situația în prezent.

Un alt exemplu a fost dat la punctul VIII în care s'a găsit explicația unei alte situații verificate pe o rețea reală.

h) Fenomenul s'a observat în trecut în special la rețelele de transport aeriene de înaltă tensiune în cazul când căpătau oarecare întindere și unde fenomenul apărea cu regularitate și arcul de punere la pământ era întreținut. Experiența a dus pentru acest fapt la tratarea neutrului în toate țările la tensiuni ce depășesc 60 kV fără nicio excepție, pe când multe rețele sub această tensiune funcționează și astăzi cu neutru izolat, deoarece fenomenul nu a apărut sau a apărut rar și slab.

Or, tocmai la aceste rețele puterea capacitivă este mare din cauza mărimii tensiunii și fenomenul se accentuează foarte mult. Calculele care vor fi prezentate într'o altă lucrare arată că la tensiuni de peste 60 kV rețelele obișnuite trebue în general să conțină fenomenul.

Dimpotrivă, la tensiuni joase, puterea capacitivă e mică, iar formulele stabilite duc la apariția fenomenului în cazuri mult mai rare (q e mic, K_1 apropiat de 1).

i) In sfârșit dăm mai jos și o verificare cantitativă a formulelor stabilite făcute pe datele experimentale ale unei încercări pe viu din anul 1933 (2).

In 1933, rețeaua Consumers P.C. (U.S.A.) de 140 kV atinsese curentul capacitiv la pământ de cca 400 A. La o încercare pe viu s'a constatat la oscilograf o amplitudine a supratensiunii pe celelalte faze, în caz de scurtcircuit pe o fază la pământ de

$$E_p = 2{,}9\,E$$

Prin tratarea neutrului s'au redus la aceeași rețea curenți capacitivi la pământ la 120 A și în această nouă situație s'a repetat scurtcircuitul obținându-se o supratensiune pe fazele sănătoase în diverse puncte de

$$E_p \geqslant 2\,E.$$

Nici la aceste încercări nu s'a observat intermitența arcului. Să încercăm verificarea supratensiunilor obținute.

Formula (7) sabilită la punctul VI pentru componenta directă a tensiunii,

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\,\delta_1}}{2\,K_1^2 \cos^2 \delta_1}$$

duce în cazul acestei încercări la:

$$U_d = \frac{1}{K}$$

deoarece unghiul δ_1 în acest caz e foarte mic și poate fi considerat egal cu 0.

In acest caz îl deducem pe K din prima încercare și anume

$$E_p = 2{,}9\,E.$$

Inseamnă dacă neglijăm componenta inversă că

$$U_d = \frac{2{,}9}{1{,}73} \qquad \text{sau} \qquad K = \frac{1{,}73}{2{,}9} = 0{,}595.$$

De unde deducem în timpul acestor încercări pentru această rețea termenul $\frac{q}{Q}$

$$K = 1 - \frac{q}{Q} = 0{,}595 \qquad \frac{q}{Q} = 0{,}405.$$

La a doua încercare s'a schimbat q din această formulă și anume s'a micșorat cu raportul curenților. Noul $\frac{q'}{Q}$ pentru a doua încercare când curenții capacitivi la pământ erau de 120 amperi devine

$$\frac{q'}{Q} = 0{,}405 \ \frac{120}{400} = 0{,}121,$$

iar K' în cazul încercării a doua

$$K' = 1 - \frac{q'}{Q} = 1 - 0{,}121 = 0{,}879.$$

Supratensiunea care ar trebui să apară în acest al doilea caz, conform formulei stabilite în acest studiu $\left(U'_d = \frac{1}{K'}\ ;\ \text{iar}\ E'_p = \frac{1}{K'}\sqrt{3}\right)$, dacă se neglijează și aici componenta inversă este

$$E'_p = \frac{1{,}73}{K'} = \frac{1{,}73}{0{,}897} = 1{,}98\ E.$$

Adică se verifică valoarea 2 obținută la a doua încercare pe aceeași rețea, dar cu curenți capacitivi reduși.

XVII. CONCLUZIILE CE POT FI DEDUSE ȘI CONSECINȚELE LOR PRACTICE

In istoricul desvoltării rețelelor, tratarea neutrului a fost hotărîtă de aceste supratensiuni specifice rețelelor cu neutru izolat a cărei cauză nu era lămurită. In prezent mai există în această problemă opinii diferite bazate pe experiențe locale, toate modurile de tratare fiind încă acceptate. Din lămurirea fenomenului reiese dela început câteva concluzii generale din care enumerăm deocamdată pe cele mai clare:

A. Evaluarea momentului când trebue tratat neutrul unei rețele

a) Momentul când trebue tratat neutrul unei rețele nu este în funcție de curentul capacitiv, cum se crede astăzi ci mai curând în funcție de raportul $\frac{q}{P_{sc}}$ dacă se ia o cifră de orientare generală.

q = puterea capacitivă totală pe secvența homopolară la tensiunea de serviciu.
P_{sc} = puterea minimă de scurtcircuit de durată trifazat (Q din formulele stabilite).

In afară de acest raport, trebue considerată situația mai defavorabilă a generatorilor și diversele împrejurări de funcționare în regim normal sau anormal pentru diverse puncte ale rețelei, în special defavorabile (unde curentul de scurtcircuit e mic).

Din primele cercetări făcute ar rezulta că un raport mai mare ca $\frac{1}{100}$ e periculos (diagrama din figura 12 și cazul cu mai mulți generatori). Problema aceasta trebue însă cercetată mai amănunțit și verificată cu diversele observații practice ce se vor putea face, această cifră neavând nicio pretenție de exactitate.

Notăm că $\frac{q}{Q} \geqslant \frac{1}{100}$ înseamnă $K = 0{,}99$ care pe curba din figura 12, duce la $U_d = 1{,}06$ la care se pot adăuga eventual amplificările arătate.

Fără amplificări, dacă considerăm cazul unei rețele cu reactanța inversă mare (caz defavorabil) și anume $p = 0{,}8$, se ajunge pentru $\frac{q}{Q} = \frac{1}{100}$ (curba din figura 12);

$$U_d = 1{,}06 \qquad U_i = 0{,}06 \cdot 0{,}8 = 0{,}048 \quad U_h = 1{,}108$$
$$E_p = 1{,}108 - a^2\, 1{,}06 - a\, 0{,}048 = 1{,}762 + j\, 0{,}866.$$

Tensiunea la pământ a fazelor sănătoase

$$F_p \text{ modul} = 1{,}95\, E.$$

Aceasta înseamnă că ne putem apropia de valoarea 2, sau mai mult a supratensiunii prelungite pentru un raport $\frac{q}{Q} \geqslant \frac{1}{100}$; supratensiunea e cu atât mai mare cu cât $\frac{q}{Q}$ este mai mare.

Evaluarea termenului $\frac{q}{Q}$ se face extrem de repede și ușor pentru orice rețea

$q = i_{cp} \frac{U}{\sqrt{3}}$ (i_{cp} = curentul capacitiv la pământ)

Q = puterea minimă posibilă de scurtcircuit permanent în punctul unde poate apare cu valoarea cea mai mică.

Dacă considerăm ca periculos raportul

$$\frac{q}{Q} \geqslant \frac{l}{100}$$

Atunci rezultă în funcție de q

$$Q \leqslant 100\, q$$

q este funcția de lungimea totală a liniilor și a cablurilor rețelei respective și ar putea fi exprimat

$$q = q_1 \cdot l$$

în care

$$q_1 = i_{cp} \frac{U}{\sqrt{3}}$$

pe o unitate de lungime de exemplu 100 km.

l = lungimea măsurată în unitatea de lungime respectivă de exemplu 100 km.

Aplicăm cele de mai sus pentru tensiunile de 60 kV și 110 kV.

Pentru 60 kV.

i_{cp} pe 100 km ..... $\cong$ 20 A

$q_1 = 20 \frac{60}{\sqrt{3}}$ ..... $\cong$ 700 KVA

$Q \leqslant 700 \cdot 100 \cdot 1$ sau

P_{sc} circuit permanent $\leqslant$ 70.000 KVA pentru 100 km linie

sau

$P_{sc} \leqslant p \leqslant 70.000 \cdot l$ în KVA cu l exprimat în sute de km, reprezintă situații periculoase.

Pentru 110 kV

i_{cp} pe 100 km ..... $\cong$ 38 A

q_1 pentru 100 km $38 \frac{115}{\sqrt{3}}$ ..... = 2500 KVA

$Q \leqslant 250.000$ KVA pentru 100 km linie

deci

$$P_{sc} \leqslant 250.000 . l \ (l \text{ exprimat în sute km}).$$

Puterile de scurtcircuit minim permanent, trec prin asemenea valori atât la liniile de 60 kV cât și la liniile de 110 kV. Aceste puteri de scurtcircuit trebue considerate fără regulatori automați de tensiune, după cum s'a arătat la punctul V. Ele trebue calculate pentru reactanțele corespunzătoare ale generatorilor în regim nesaturat pentru o completă acoperire și pentru momentele când în rețea s'ar putea produce valorile cele mai mici pentru puterile de scurtcircuit.

In *consecință socotim că formulele simplificate de tipul celor de mai sus, ar putea înlocui cu succes practica de astăzi, care stabilește momentul când trebue tratat neutrul unei rețele, în funcție numai de curentul capacitiv la pământ* (de ex. $\frac{q}{Q} \geqslant \frac{1}{100}$; sau $\frac{x_{is}}{x_0} \geqslant \frac{1}{100}$; x_{is} = reactanța directă de regim permanent).

b) Pentru rețelele aeriene cu multe ramuri, unde sunt posibile declanșări intempestive simultane cu conturnări de izolatori, pare prudent să se trateze neutrul începând chiar dela limite ale raportului $\frac{q}{Q}$ mai mici ca cele ce rezultă de mai sus, având în vedere amplificările însemnate pe care le poate lua fenomenul în cazul variației de putere arătate la punctul XIV, precum și fenomenele tranzitorii de care nu ne-am ocupat deloc aici.

c) Introducerea reactorilor pentru limitarea curenților de scurtcircuit poate duce la apariția fenomenului. Această concluzie nouă a studiului de față poate prezenta o mare importanță în practică, atunci când într'o rețea cu neutrul izolat este necesar la un moment dat să se introducă bobine de reactanță de limitare a scurtcircuitelor. Calculul se face ușor, fiind similar cu cel din exemplul dat cu scurtcircuitul în capul unei linii aeriene, reactanțele liniei aeriene fiind înlocuite de cele ale bobinei. Se poate astfel estima solicitările izolației de durată ce apar și aprecia măsurile ce ar trebui luate, eventual tratarea neutrului odată cu introducerea bobinelor, cu toate că rețeaua respectivă nu prezenta până atunci « supratensiunea prelungită ».

d) In orice caz se poate afirma că pe această cale se poate determina prin calcul momentul când o rețea nu mai poate rămâne cu neutrul izolat. Se știe că astăzi se estimează un anumit curent capacitiv pentru diverse tensiuni (5 A, 25 A, 50 A) dela care încolo se recomandă mai mult în mod empiric, tratarea neutrului.

B. Anumite tipuri de tratări ale neutrului nu sunt recomandabile

— Tratarea cu o bobină de reactanță subacordată, care să reducă curentul de punere la pământ, la valori ce nu atrag arderea cablului sau pagube din efectul termic. La acest tip de tratare șuntul echivalent ce apare pe frecvența directă în cazul unei puneri la pământ, rămâne capacitiv și fenomenul poate avea mai departe loc în unele cazuri.

— Tratarea printr'o rezistență mare pentru a nu se obține curenți de scurt-circuit mari pe o fază, așa cum se obține în cazul legării directe la pământ, poate să fie de asemenea periculoasă dacă rezistența e mai mare decât valoarea ce dă șuntului echivalent o valoare inductivă. Peste o anumită mărime a rezistenței secvența homopolară rămâne cu rezultantă capacitivă.

C. Condițiile generale care favorizează fenomenul ar fi următoarele

— Puterea homopolară capacitivă mare.

— La aceeași putere homopolară fenomenul apare cu atât mai ușor cu cât:

a) generatorii sunt mai mici (puterea de scurtcircuit mică),

b) puterile reactive consumate mici;

c) generatorii au unghiuri diferite față de punctul unde a apărut defectul;

d) sunt în special sensibile rețelele în momentul când au ajuns în unele puncte la limita stabilității statice a tensiunii $\left(\frac{dQ}{dU}\text{ mic}\right)$. Acele puncte sunt în acest caz puncte periculoase pentru o punere la pământ;

e) sunt în special periculoase momentele de perturbații generale în rețea, când se înregistrează la unele noduri oscilații de tensiune, datorite schimbărilor de unghiuri ale generatorilor. Rețelele ce au în mod obișnuit variații mari de sarcină sunt mai periclitate.

f) întreruperile intempestive concomitente cu conturnări de izolatori favorizează de asemenea fenomenul.

D. Anumite tipuri de tratări ale neutrului fac să dispară total fenomenul

a) Punerea directă la pământ, deoarece în acest caz secvența homopolară are întotdeauna o rezultantă inductivă.

b) Punerea la pământ prin reactanță supra-acordată (domină curentul inductiv în defect) deoarece și în acest caz șuntul echivalent ce se introduce în caz de defect este inductiv.

Ambele aceste tipuri de tratare duc la scăderea tensiunii fazelor sănătoase în caz de defect (K_1 din formulă devine mai mare ca 1).

E. Amestecul de linii aeriene și cabluri subterane pe aceeași bară pot face să apară fenomenul în anumite cazuri sau să-l amplifice atunci când rețeaua îl prezenta deja (rețeaua de cabluri)

Calculul de estimație pentru acest caz este relativ ușor de făcut (exemplul de calcul punctul XV, A); el ar putea duce la concluzii extrem de fructuoase pentru exploatări, atunci când sunt obligate de condiții economice să adauge pe aceeași bară linii aeriene la cabluri subterane, în special linii cu rezistență ohmică mică (secțiuni mari).

Notăm că practica curentă, care constă din legarea liniei aeriene printr'o bucată de cablu la bara respectivă, nu aduce nicio îmbunătățire situației pentru acest

gen de supratensiune, această dispoziție ducând numai la turtirea undelor provocate de descărcări atmosferice de-a-lungul liniilor aeriene. In caz de furtună deci chiar cu această dispoziție conturnările de izolatori pot atrage la anumite caracteristici de funcționare ale rețelei, ivirea supratensiunii prelungite în rețeaua de cabluri cu pericolele cunoscute.

F. Nu este necesar să se trateze neutrul în toate punctele

In această privință exemplul ales la punctul XV, *B*, este lămuritor. In situațiile reale se pot face estimații prin calcul și determina punctele unde este indispensabil să se trateze neutrul și punctele unde poate fi lăsat izolat.

Se știe că această situație trebue determinată, mai ales atunci, când se cere limitarea curenților de scurtcircuit monofazat.

XVIII. JUSTIFICAREA TERMENULUI «REZONANȚA ALTERNATORILOR» ȘI ALTE CONSIDERAȚII GENERALE

Din diversele cazuri examinate în acest studiu se vede că în cazul ridicării tensiunii cu valori mici, așa cum se întâmplă în cazurile curente nu există propriu zis rezonanță.

In situațiile când se obțin supratensiuni foarte mari, pentru cazuri în care puterile homopolare capacitive sunt mari și puterea reactivă totală consumată de diversele circuite pe secvența directă este mică, se înregistrează de fapt un fenomen de rezonanță clasic și «supratensiunea prelungită» ia teoretic valori enorme, care sunt bineînțeles, limitate de pierderi. Socotim termenul «rezonanța alternatorilor» ca nimerit pentru acest motiv, el dând o expresie apropiată de realitatea fizică a fenomenului, atunci când poate apare cu maximum de intensitate în cazurile extreme.

«Arcul intermitent», care de fapt nu e necesar să fie intermitent, apare bineînțeles în cazul oricărei puneri la pământ, în special la linii aeriene, unde conturnările de izolatori sunt fenomene dese. Arcul deci, însoțește de obicei acest fenomen, fără însă a avea în mod necesar o influență specială asupra mărimii supratensiunii pentru explicarea ei când condițiile expuse în această lucrare sunt îndeplinite.

Incercări și observații viitoare vor trebui să dovedească dacă această interpretare a fenomenului e suficientă pentru toate cazurile și dacă mai este cazul să se considere mai departe pentru anumite situații, pericolul «arcului intermitent» și unde anume. De curând Prof. M. D. D j u v a r l î, a studiat în detaliu posibilitățile arcului ca generator de supratensiuni, stabilind limitele posibile ale acestui fenomen (5) (6). Sperăm că în curând se va putea trasa o delimitare precisă între posibilitățile «arcului», care par a se manifesta la curenți capacitivi mici și ale fenomenului studiat aici . In genere, situațiile observate în trecut par lămurite pe această cale, iar încercările pe rețele reale infirmă teoria «arcului intermitent» în cazurile periculoase cu curenți capacitivi puternici la pământ.

★

Studiul făcut a fost rezumat la căutarea unui fenomen de durată, care a fost găsit ca posibil, și ale cărui valori de calcul, după cum am văzut, verifică numeroasele observații făcute în trecut asupra rețelelor de înaltă tensiune.

O primă observație ce trebue făcută este: reactanțele echivalente de regim permanent cu valorile alese mai sus pentru generatori sunt chiar acele ce intervin în fenomenul stabilit. In calculele făcute aici, noi am considerat în gol reactanțe

de regim permanent mari (150%) în ipoteza că generatorul funcționa la începutul curbei de saturație și mai mici în sarcină (100%) în ipoteza că generatorul funcționa spre partea saturată a curbei de magnetizare. Se știe însă că fenomenele de ferorezonanță au loc pentru orice valoare a reactanței de-a-lungul curbei de magnetizare. Astfel e de lămurit dacă reactanțele micșorate în jurul cifrei de 100% pentru regimul în sarcină, considerate la fel ca în calculele aproximative de stabilitate, sunt cele ce intervin în acest fenomen sau trebue considerate reactanțe mai mari, apropiate de cele în gol, care intervin numai pe porțiunea nesaturată a curbei de magnetizare. *Ceea ce ar trebui în special lămurit este reactanța de regim permanent echivalentă a generatorilor în cazul unei mici variații a puterii reactive ținând seama și de disimetria caracteristică.*

Valorile acestei reactanțe nu sunt identice cu cele de regim permanent ce se determină în mod curent atunci când se caută limita interioară a puterii în regim permanent; din cercetări făcute de autor și nepublicate aici ar rezulta că reactanța echivalentă în acest caz este mai mare.

Notăm că reactanțele mărite duc la valori mai mari pentru supratensiunea prelungită în timpul de calcul, ales aici. Acest motiv ne-a dus la căutarea fenomenului pe reactanțele obișnuite de regim permanent, pentru a ne feri de interpretări false, deoarece în cazul reactanțelor mărite, care ar fi fost însă discutabile supratensiunea apare cu atât mai mult.

★

Nu ne-am ocupat deloc de partea inițială a fenomenului până la stabilirea unui fenomen de durată. Această primă parte este studiată și fenomenele oarecum cunoscute.

Este evident însă, că în ceea ce privește tratarea neutrului este necesar să se ia în considerație și această primă parte a fenomenului, așa că concluziile de mai sus (punctul XVII) trebue înțelese limitat, ca cele ce decurg exclusiv din considerarea « Supratensiunii prelungite ».

★

In al treilea rând s'a presupus că nu intervin reglaje de tensiuni în timpul apariției fenomenului. Acest lucru poate fi real numai în cazul când avem o punere la pământ simplă, dar nu va fi niciodată exact într'o rețea modernă în cazurile mai complexe de perturbații, în care intervin simultan și declanșări intempestive și variații ale unghiurilor generatorilor.

In cazul declanșărilor intempestive de întrerupători, dacă se presupune că ele au fost produse de scurtcircuite bifazate — pământ, pe linii diferite, linia care a declanșat prinde cu siguranță reglajul tensiunii pe un punct de tensiune mai ridicat, datorită intervenției reglajului automat în timpul scurtcircuitului.

In acest caz, după ridicarea unei puneri la pământ, rămâne deci a doua punere la pământ cu o tensiune ridicată. In afară de fenomenul tranzitoriu, care poate introduce șocuri scurte de supratensiuni, la eliminarea unui scurtcircuit, se introduce între fazele sănătoase și pământ o supratensiune similară cu cea examinată aici, cu un caracter semipermanent, în funcție de caracteristicele reglajului tensiunii. Fenomenul poate fi în total mai periculos decât cel simplificat, examinat în acest studiu. Evaluări cantitative, în asemenea cazuri sunt foarte greu de făcut, se poate însă vedea că există posibilități de pericol în aceste cazuri mai complexe și pentru rețelele în care supratensiunea prelungită ar apare cu valori reduse, la o simplă punere la pământ.

ПРИЧИНА «ДЛИТЕЛЬНЫХ» ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПЯХ С ИЗОЛИРОВАННЫМ НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Было замечено, что в цепях высокого напряжения с изолированным нулевым проводом, в случае заземления одной из фаз, появляются «длительные» перенапряжения на двух других фазах. Величина этого перенапряжения, замеченного в прошлом, достигла 1,73 E до 3,5 E. В очень редких случаях это перенапряжение достигало большой величины. В настоящее время нулевой провод высоковольтных линий подвергается известной обработке и в этом случае «длительные» перенапряжения больше не появляются. Однако и в настоящее время существуют линии с изолированным нулевым проводом, более низкого напряжения (6,1035 кв), в которых иногда появляются «длительные» перенапряжения. В настоящее время объясняют это явление «перемежающейся дугой». Однако при опытном исследовании, произведенном в 1930—1933 годах в осциллографе, не замечалось перерыва дуги, и это объяснение, повидимому, не является верным. Другие авторы (Штейнметц) старались найти объяснение в самой дуге, установившейся по отношению к земле, но это объяснение было принято еще более неблагоприятно. Автор снова рассматривает эту задачу и исследует ее с помощью симметричных слагающих на основании эквивалентной схемы, образующейся в случае короткого замыкания на землю. Если будем исходить из следующих предпосылок:

1. ваттная мощность не изменяется в момент заземления;

2. реактивная мощность изменяется пропорционально квадрату напряжения;

3. синхронное реактивное сопротивление генератора остается неизменным;

4. напряжение сзади синхронного реактивного сопротивления генераторов остается неизменным;

то придем к формуле, выраженной через относительные единицы

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K^2 \sin^2 2\delta}}{2 K^2 \cos^2 \delta},$$

где

U_d — прямая слагающая напряжения в месте аварии;

δ^d — угол между напряжением генератора и этим напряжением;

$K = 1 - \frac{q}{Q}$ — член, показывающий приближение к резонансу;

q — емкостная мощность эквивалентного шунта, введенного в прямой последовательности в случае короткого замыкания, равная $i_{pc} E$, где (i_{pc} — емкостный ток в землю, а E — фазное синусоидальное напряжение в точке аварии);

Q — общая реактивная мощность в прямой последовательности в случае приложения номинального напряжения к точке аварии.

Таким образом Q является величиной, равной току трехфазного короткого замыкания.

Можно доказать, что угол δ не может превосходить 45° для случая устойчивых со статической точки зрения перед их заземлением частей.

Автор находит самостоятельный метод для оценки прямой слагающей, а в случае нескольких генераторов с различными углами сдвига фаз, когда невозможно применить превращение схемы для нахождения эквивалентного генератора, он ищет общих решений и указывает на весьма простой графический способ.

Напряжения в точке аварии находят, слагая напряжения на трех последовательностях прямой, обратной и гомополярной.

Автор рассматривает различные типы цепей и приходит к заключению, что порядок величины напряжения по отношению к земле является величиной, наблюдаемой в действительности в этих цепях.

Автор приходит к заключению, что это является возможным объяснением «длящихся» перенапряжений. Он указывает, что объяснение явления этим способом удовлетворяет как наблюдениям, произведенным в прошлом на эксплоатационных установках, так и значениям, полученным в прошлом на опытных исследованиях, которые не могли разъяснить это явление (согласно объяснениям, данным Петерсоном, Слепияном и другими).

Автор доказывает, что вместо значения емкостных токов заземления, дающих в настоящее время эмпирическую норму того момента, когда необходимо обработать нулевой провод цепи, очевидно, гораздо удобнее, в соответствии с новым объяснением, принять как указание отношение $\frac{q}{Q}$, которое весьма легко можно установить в любой цепи.

Автор указывает, что для отношения $\frac{q}{Q} \geqslant \frac{1}{100}$ «длительные» перенапряжения могут достигнуть значения 2, если принимать во внимание и обратную слагающую. Чем больше это отношение, тем больше и перенапряжение. Для $\frac{q}{Q} = 1$ имеем резонанс. Q можно принять равным мощности короткого замыкания в постоянном режиме (без регулирования возбуждения). Надо заметить, однако, что вследствие наличия так называемого явления резонанса в железе, гораздо осмотрительней принять внутреннее реактивное сопротивление генераторов в ненасыщенном режиме (гораздо более значительное, в некоторых случаях, чем соответствующее постоянному режиму короткого замыкания). Определяют значения для различных напряжений. Автор доказывает, что для напряжения, превосходящего 60 кв, это «длитель ное» перенапряжение будет, повидимому, появляться всегда.

Целый ряд других соображений и заключений в связи с обработкой нулевого провода показывает, что новое объяснение явления, очевидно, дает возможность точных расчетов моментов, когда это перенапряжение может появиться, возможность найти его величину в цепи, а также способ обработки нулевого провода. Автор дает несколько примеров расчетов, а также разбор положений на основании новой теории.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Напряжение фазы b в случае короткого замыкания на землю фазы a, в единицах номинального фазового напряжения.

Рис. 2. — a — принципиальная схема. b и c — эквивалентная схема с коротким замыканием на фазе a в точке A для трех последовательных цепей.

Рис. 3. — Кривая $I=f(xi)$ для генератора, обладающего мощностью P, меняющейся от 1 до ∞.

Рис. 4. — Кривая $D=f(K\,xi)$ для генератора, обладающего мощностью P, меняющейся от 1 до $+\infty$.

Рис. 5. — Графическое представление, дающее возможные значения для x_0 для величин xi, заключенных между 0,08 и 0,3.

Рис. 6. — Схема, приведенная к эквивалентному генератору A, с реактансом x_1 $(xg + x_2 + x_3 \cdots)$, доставляющему в точку B ваттную энергию P_S и реактивную энергию Q_s.

Рис. 7. — Эквивалентный шунт в случае, если рассматривается и обратный реактанс, равный $xi - xh$.

Рис. 8. — Превращения схемы для приведения ее к типам схем с одним генератором.

Рис. 9. — Перенесение ваттной нагрузки в точку аварии.

Рис. 10. — Диаграмма напряжений для поврежденной сети и для сети, связанной магнитной индукцией с предыдущей.

Рис. 11. — Диаграмма работы с повреждением и без него.

Рис. 12. — График прямой слагающей напряжения в точке повреждения в зависимости от $K_1 = 1 - \frac{q}{Q}\left(\text{или } \frac{q}{Q}\right)$ для различных значений начального угла сдвига фаз.

Рис. 13. — Оценка падения напряжения для обратного реактанса.

Рис. 14. — Диаграмма для нахождения угла сдвига фаз генератора.

Рис. 15. — Кривые $Q = f(U)$, действительные для двух типов электросетей. Пунктирная кривая $Q = QsU^2$.

Рис. 16. — Два генератора, подающих на фидер, где происходит аварийное заземление.

Рис. 17. — Диаграмма напряжений в случае двух генераторов, причем рассматривается один эквивалентный генератор (AC с переносом в AC') и два отдельных генератора (AC с переносом в AC'').

Рис. 18. — Кривая постоянных мощностей.

Рис. 19. — Графическое построение для определения напряжения для прямой последовательности, в случае двух генераторов с различными углами сдвига по отношению к точке аварии.

Рис. 20. — Сеть, питаемая несколькими электростанциями или генераторами, имеющими различные углы сдвига фаз на фидерах сети.

Рис. 21. — Диаграмма любого количества электростанций с различными углами сдвига относительно аварийной точки.

Рис. 22. — Диаграмма для любого количества генераторов, имеющих различные углы сдвига фаз.

Рис. 23. — Оценка производной.

Рис. 24. — Определение эквивалентных генераторов, работающих в пределе статической устойчивости.

Рис. 25. — Эквивалентный шунт воздушной линии, имеющей заземление на одном из фидеров в конце этой линии.

Рис. 26. — a — комплексная сеть на 6 kV, кабель и воздушные линии, питаемые местным источником (4—80 MVA) и внешним источником, а именно гидроцентралью. b — диаграмма для нахождения углов сдвига фаз генератора.

Рис. 27. — График для двух генераторов, из которых один отдаленный, а второй непосредственно присоединенный к сети на 6 kV.

LES SURTENSIONS « PROLONGÉES » DANS LES RÉSEAUX À HAUTE TENSION DONT LE NEUTRE EST ISOLÉ

(RÉSUMÉ)

Dans les réseaux à haute tension dont le neutre est isolé, on a remarqué que, dans le cas de la mise à la terre d'une phase, il y a surtension « prolongée » sur les deux autres phases. Le chiffre de cette surtension, observée dans le passé, atteignait 1,73 E jusqu'à 3,5 E et même davantage, rarement. A présent, on traite le neutre des réseaux à haute tension et, dans ce cas, la surtension « prolongée » ne se produit plus. Il y a cependant, aujourd'hui encore, des réseaux dont le neutre est isolé, à tensions moins hautes (6, 10, 35 kV) où la surtension « prolongée » apparaît parfois. L'explication que l'on donne actuellement de ce phénomène est celle de « l'arc intermittent ». Au cours des essais sur le vif, effectués entre 1930 et 1933, l'oscillographe n'a cependant pas révélé l'intermittence de l'arc et cette explication ne semble pas être l'explication la plus juste. D'autres auteurs, tel S t e i n m e t z, ont tenté d'expliquer le phénomène par l'arc même qui s'établit à la terre, mais cette explication a reçu un accueil encore moins favorable. L'Auteur reprend ce problème et l'étudie à l'aide des composantes symétriques, à partir du schéma équivalent établi dans le cas d'un court-circuit à la terre. Si l'on suppose les prémisses suivantes:

1. La puissance active ne varie pas au moment de la mise à la terre.
2. La puissance réactive varie selon le carré de la tension.
3. La réactance synchrone du générateur demeure inchangée.
4. La tension demeure la même derrière la réactance synchrone des générateurs.

On arrive, dans des unités relatives à la formule

$$U_d^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K^2 \sin^2 2\,\delta}}{2\,K^2 \cos^2 \delta}$$

où

U_d est la composante directe de la tension au lieu du défaut;

δ^d est l'angle de la tension du générateur et de cette tension;

$K = 1 - \frac{q}{Q}$ est un terme indiquant le rapprochement de la résonance;

q = la puissance de capacité du shunt équivalent, introduit dans le cas d'un court-circuit sur séquence directe, et égal à $i_{pc}\,E$ où (i_{pc}, le courant de capacité à la terre et E, la tension simple, sinusoïdale, au point du défaut);

Q = la puissance réactive totale sur une suite directe lorsque l'on applique la tension nominale au point du défaut.

Ainsi, Q est une grandeur égale au courant du court-circuit triphasé.

On démontre que l'angle δ ne peut dépasser 45°, dans les réseaux qui, avant la mise à la terre, avaient une certaine stabilité au point de vue statique.

On établit des méthodes originales d'appréciation de la composante directe. Lorsque l'on a plusieurs générateurs aux angles différents, en présence, et qu'il ne serait pas possible d'appliquer la transformation du schéma en vue de trouver un générateur équivalent, on cherche les solutions stables de ce cas aussi et l'on indique une méthode graphique extrêmement simple.

On trouve la tension au point du défaut, en partant de la composition des tensions sur les trois séquences: directe, inverse et homopolaire.

On étudie différents types de réseaux et l'on arrive à la conclusion que l'ordre de grandeur de la tension à la terre est celui de la grandeur réellement observée dans les réseaux.

L'Auteur en conclut que telle semble être l'explication de la « surtension prolongée ». Il montre que cette interprétation du phenomène vérifie les observations passées, faites dans les exploitations, aussi bien que les valeurs obtenues au cours des essais sur le vif faits dans le passé et qui n'ont pas pu, alors, élucider le phénomène (conformément aux explications données par P e t e r s o n, S l e p i a n, etc).

On montre que, conformément à la nouvelle explication, il est beaucoup plus normal de prendre pour indication le rapport $\frac{q}{Q}$ fort aisé à établir dans un réseau. Ceci, au lieu d'utiliser la valeur des courants de capacité à la terre, qui fournissent aujourd'hui une règle empirique sur le moment où le neutre d'un réseau doit être traité.

L'Auteur montre que pour un rapport $\frac{q}{Q} \geqslant \frac{1}{100}$ les surtensions prolongées peuvent atteindre le chiffre 2 si l'on tient également compte de la composante inverse. Plus ce rapport est grand, plus la surtension est grande $\frac{q}{Q} = 1$ résonance. Q peut être considéré égal à la puissance de court-circuit en régime permanent (sans réglage de l'excitation). On remarque cependant que, étant donné qu'il s'agit d'un phenomène de ferro-résonance, il est plus prudent de considérer la réactance interne des générateurs en régime non saturé (dans certains cas, supérieure à celle qui correspond au régime permanent de court-circuit). On fait des évaluations pour différentes tensions. On montre que, pour une tension supérieure à 60 kV, il semble probable que cette surtension prolongée apparaisse constamment.

Toute une série d'autres considérations et conclusions concernent le traitement du neutre. La nouvelle explication du phénomène semble permettre de calculer de façon précise les moments où cette surtension peut avoir lieu, son ordre de grandeur dans un réseau et le traitement du neutre qui en résulte. On donne quelques exemples de calcul et des analyses de situations, basés sur la nouvelle théorie.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — La tension de la phase b dans le cas du court-circuit à la terre sur la phase a, en unités de la tension nominale sur phase.

Fig. 2. — a. Schéma de principe. b et c. Schéma équivalent du court-circuit sur les phases a, au point A pour les 3 réseaux séquents.

Fig. 3. — La courbe $I = f(x_i)$ pour un générateur de puissance P variant entre 1 et ∞.

Fig. 4. — La courbe $D = f(Kx_i)$ pour un générateur de puissance P variant entre 1 et $+\infty$.

Fig. 5. — Graphique donnant les valeurs possibles de x_0 pour x_i entre 0,08 et 0,3.

Fig. 6. — Schéma réduit du générateur équivalent A à la réactance x_1 ($xg + x_2 + x_3 \ldots$) qui débite dans le point B une énergie active Ps et réactive Qs.

Fig. 7. — Le shunt équivalent dans le cas où l'on considère aussi la réactance inverse égale à $x_i - x_h$.

Fig. 8. — Transformation du schéma pour le ramener au type du générateur unique.

Fig. 9. — Déplacement de la charge active au point du défaut.

Fig. 10. — Diagramme des tensions dans le réseau à défaut et dans le réseau magnétiquement relié au premier.

Fig. 11. — Diagramme de fonctionnement avec et sans défaut.

Fig. 12. — Graphique de la composante directe de la tension au point du défaut, en fonction de $K_1 = 1 - \frac{q}{Q}\left(\text{ou } \frac{q}{Q}\right)$ pour différentes valeurs de l'angle initial.

Fig. 13. — Appréciation de la baisse de tension en réactance inverse.

Fig. 14. — Diagramme pour la solution de l'angle du générateur.

Fig. 15. — Courbes $Q = f(U)$ réelles pour deux types de réseaux. Tracé pointillé: la courbe $Q = Q_s U^2$.

Fig. 16. — Deux générateurs débitant sur une barre où se produit un défaut à la terre.

Fig. 17. — Diagramme des tensions dans le cas de deux générateurs, lorsqu'on considère un générateur équivalent (AC à déplacement en AC') et deux générateurs séparés (AC à déplacement en AC'').

Fig. 18. — Courbe des puissances constantes.

Fig. 19. — Construction graphique pour déterminer la tension sur la séquente directe dans le cas de deux générateurs à angles différents par rapport au point du défaut.

Fig. 20. — Un réseau alimenté par plusieurs usines ou générateurs à angles différents sur les barres du réseau.

Fig. 21. — Diagramme, pour un nombre quelconque d'usines, à angles différents par rapport au point de défaut.

Fig. 22. — Diagramme, pour un certain nombre de générateurs à angles différents.

Fig. 23. — Evaluation de la dérivée.

Fig. 24. — Détermination des générateurs équivalents à la limite de la stabilité statistique.

Fig. 25. — Le shunt équivalent d'une ligne aérienne mise à la terre à l'aide d'une barre à son extrémité.

Fig 26. — *a*. Réseau complet de 6 kV, câbles et lignes aériennes, alimenté par une source locale (de 4 à 80 MVA) et une source extérieure, une centrale hydraulique.

b. Diagramme pour déterminer les angles du générateur.

Fig. 27. — Graphique du calcul pour deux générateurs, l'un des deux éloigné, le second relié directement au réseau de 6 kV.

BIBLIOGRAFIE

1. P. Jdanov, *Ustoicivosty electriceschih sistem.* Moscova, 1948, p. 61.
2. L. I. Sirotinschi, *Tehnica vîsochih napreajenii.* Moscova, 1945 v. III, p. 45—70, p. 120—124.
3. W. Petersen, E.T.Z., 1917, Nr. 38, p. 553—567.
4. Peters Slepian, Journal of the AIEEU. 1923, v. XLII, p. 781.
5. M. Djuvarlî, Electricescaia Stanție, 1951, Nr. 5.
6. — Electricestvo, 1953, Nr. 6.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ELECTROENERGETICĂ

VERIFICAREA PRIN CALCUL A SUPRATENSIUNII PRELUNGITE POSIBILE, ÎN IPOTEZA REZONANŢEI, PENTRU REŢELE CU NEUTRU IZOLAT

DE

F. MANEA

In lucrarea *Cauza supratensiunilor « prelungite » în reţelele cu neutru izolat* de P. D i m o s'a arătat posibilitatea interpretării apariţiei supratensiunilor interne « prelungite », până astăzi explicate prin ipoteza « arcului intermitent », ca datorită unui fenomen permanent de rezonanţă.

Ne propunem studiul diverselor tipuri de reţele, pentru a găsi cazurile generale în care pot apărea supratensiunile de durată, în reţele de diverse tensiuni, pentru diferite sarcini ale generatorilor şi consumatorilor, după noua interpretare.

Se includ aici şi reţelele care funcţionează astăzi în mod normal cu neutrul legat la pământ, direct sau prin bobină de stingere, considerându-se izolate, spre a vedea dacă supratensiunea care ia naştere când o fază se pune la pământ constitue un motiv de tratare a neutrului.

Punerea la pământ a unei faze, într'o reţea trifazată cu neutrul izolat, se poate studia ca fenomen de disimetrie, analog scurtcircuitului monofazat din cazul reţelelor cu neutrul tratat, prin componente simetrice.

1. LINIE DE 110 KV. METODĂ GENERALĂ DE CALCUL. PUTERE ÎN FUNCŢIUNE 30 MVA

Considerăm cazul unui transport de energie electrică dela o centrală de 30 MVA, printr'o linie de 125 km, la 110 kV, conform schemei din figura 1.

Calculul diverselor elemente de impedanţă ale reţelelor de secvenţă îl vom face în unităţi « relative », adică vom lua pentru puteri o unitate de 30 MVA, numită putere de bază, iar pentru tensiuni o unitate de 6,3 kV, numită tensiune de bază.

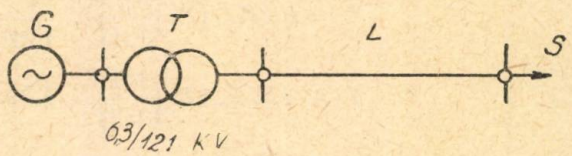

Fig. 1

Rezultă în consecinţă o impedanţă de bază

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{6{,}3^2}{30} = 1{,}32\ \Omega$$

şi un curent de bază

$$I_b = \frac{S_b}{U_b} = \frac{30}{6{,}3} = 4{,}76\ \text{KA}.$$

In felul acesta, diversele valori vor apare comparativ cu mult mai multă uşurinţă. Luând ca tensiune de referinţă tensiunea la bornele generatorului, aleasă şi ca tensiune de bază, vom obţine simplificări importante în calcule.

a) Funcţionarea în gol

Generatorul G, funcţionând în gol şi nesaturat, are o tensiune procentuală de scurtcircuit trifazat de $\varepsilon_d = 180\%$.

Reactanţa sa sincronă va fi deci

$$X_d = \frac{\varepsilon_d}{100} \cdot \frac{\left(\frac{U_r}{U_b}\right)^2}{\frac{S_n}{S_b}} = \frac{\varepsilon_d}{100} = \frac{180}{100} = 1{,}8,$$

iar reactanţa inversă, cu $\varepsilon_i = 15\%$,

$$X_i = \frac{25}{100} = 0{,}25.$$

Transformatorul T, de aceeaşi putere 30 MVA ca şi generatorul cu $\varepsilon = 14\%$ şi curent de mers în gol $i_0 = 3\%$ are

$$X_t = \frac{14}{100} = 0{,}14 \text{ şi } Y_t = \frac{3}{100} = 0{,}03.$$

Linia L, trifazată, formată din trei conductori cablaţi de Cu, aşezaţi pe stâlpi portal, are

$r = 0{,}158\ \Omega/\text{km}$
$x = 0{,}427\ \Omega/\text{km}$
$c = 8{,}5.10^{-9}$ F/km $\rightarrow y = 2{,}67.10^{-6}$ S/km
$c_h = 5{,}96.10^{-9}$ F/km $\rightarrow y_h = 1{,}87.10^{-6}$ S/km (homopolară)
$x_h = 1{,}2\ \Omega/\text{km}$ (homopolară).

In unităţi relative şi raportând la tensiunea dela bornele generatorului, avem pentru toată lungimea liniei

$$R = rL\left(\frac{U_r}{U_n}\right)^2 \cdot \frac{1}{Z_b} = 0{,}158 \cdot 125\left(\frac{6{,}3}{121}\right)^2 \cdot \frac{1}{1{,}32} = 0{,}0388$$

$$X = 0{,}427 \cdot 125\left(\frac{6{,}3}{121}\right)^2 \cdot \frac{1}{1{,}32} = 0{,}105$$

$$Y = 2{,}67 \cdot 125\left(\frac{121}{6{,}3}\right)^2 \cdot 1{,}32.10^{-6} = 0{,}156$$

$$Y_h = 1{,}87 \cdot 125\left(\frac{121}{6{,}3}\right)^2 \cdot 1{,}32.10^{-6} = 0{,}11$$

$$X_h = 1{,}2 \cdot 125\left(\frac{6{,}3}{121}\right)^2 \cdot \frac{1}{1{,}32} = 0{,}296.$$

Schemele echivalente de secvență vor fi atunci cele din figura 2.
Curentul capacitiv de punere la pământ va fi

$$I_c = \sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot Y_h = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}87 \cdot 10^{-6} \cdot 125 = 44{,}5 \text{ A.}$$

Considerând o punere la pământ a unei faze la capătul receptor al liniei funcționând în gol, schemele de secvență se leagă în serie după cum se vede în figura 3.

Rețeaua din figura 3 o putem descompune conform teoremei Helmholtz-Thévenin, în două rețele (fig. 4).

Am notat cu $\overline{U}_0$ tensiunea de serviciu a rețelei în funcționare normală, în punctul unde ulterior va apare defectul.

Raportată la tensiunea de referință și exprimată în unități relative, ea este egală cu unitatea.

Deoarece la locul cu defect avem $\overline{U}_1 = 0 = \overline{U}_h + \overline{U}_d + \overline{U}_i$, este suficientă cea de-a doua rețea («pasivă») pentru aflarea tensiunilor $\overline{U}_h$, $\overline{U}_i$ și deci $\overline{U}_d$.

Neglijând rezistența și simplificând rețeaua directă, obținem pentru rețeaua pasivă schema din figura 5.

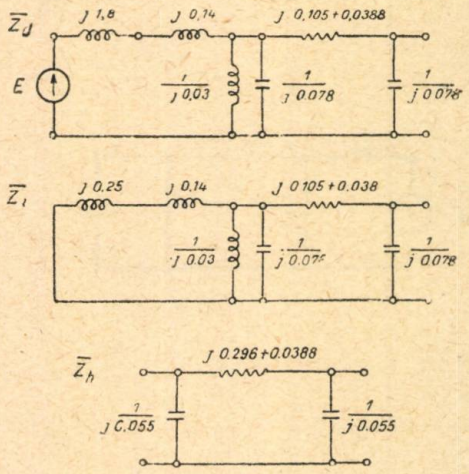

Fig. 2

Avem

$$\overline{U}_d = -(\overline{U}_i + \overline{U}_h) = \frac{\overline{U}_0(\overline{Z}_h + \overline{Z}_i)}{\overline{Z}_d + \overline{Z}_h + \overline{Z}_i} = \frac{1(-j\,9{,}06 + j\,0{,}545}{j\,2{,}72 - j\,9{,}06 + j\,0{,}545} = 1{,}47.$$

Dacă în schemele de secvență inversă și homopolară putem neglija rezistențele față de reactanțe, din diagrama vectorială a tensiunilor (figura 6), făcând proiec-

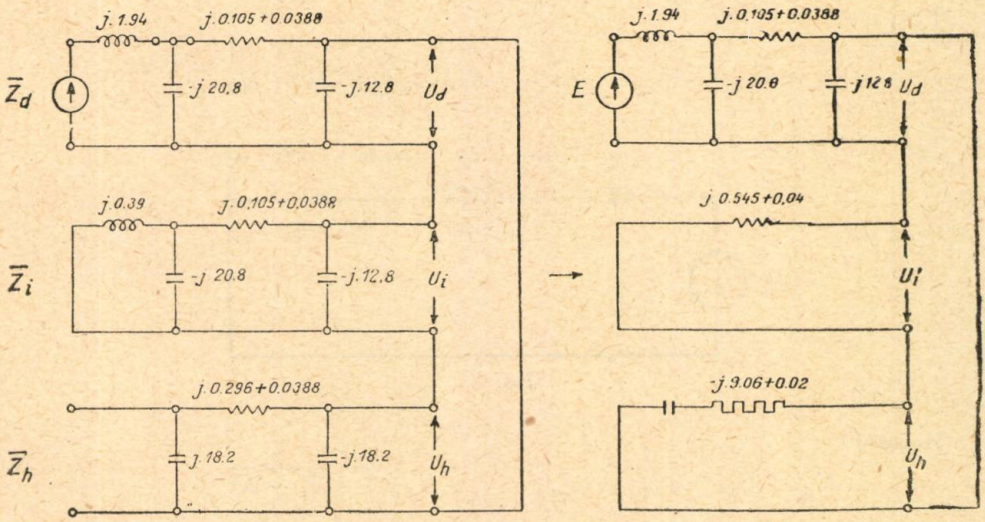

Fig. 3

țiile pe două axe rectangulare, obținem

$$U_{12x} = U_{13x} = U_h + \frac{U_d + U_i}{2} = U_d + U_i + \frac{U_d + U_i}{2}$$

Dacă notăm $\frac{U_i}{U_d} = K = \frac{Z_i}{Z_i + Z_h}$ avem

$$U_{12x} = U_{13x} = \frac{3}{2} U_d (1 + K).$$

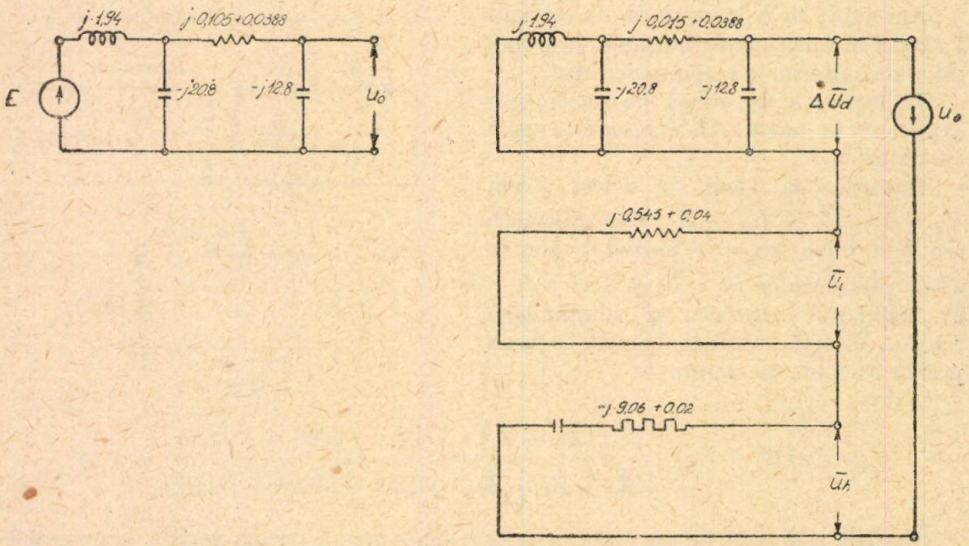

Fig. 4

La fel

$$U_{12y} = U_{13y} = \frac{3}{2} (U_d - U_i) = \frac{3}{2} U_d (1 - K).$$

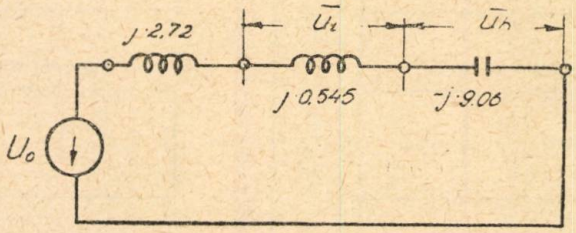

Fig. 5

Rezultă

$$U_{12} = U_{13} = U_{12x}^2 + U_{12y}^2 = 3 \cdot U_d \sqrt{1 + K + K^2}$$

$$U_{23} = 2\, U_{12y} = 3 \cdot U_d (1 - K).$$

Pentru exemplul anterior avem

$$K = \frac{0{,}545}{8{,}515} = 0{,}064,$$

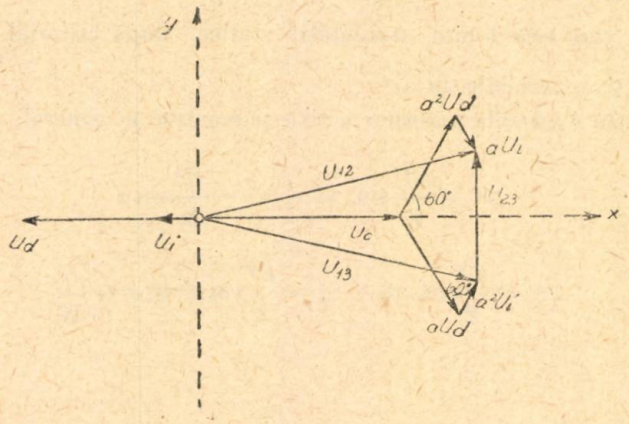

Fig. 6

astfel încât

$$E_p = U_{12} = \sqrt{3} \cdot 1{,}48 \cdot 1{,}068 = 2{,}66.$$

b) Funcționarea în sarcină

Pentru cazul funcționării în sarcină, în ipoteza menținerii constante a puterii active, vom utiliza relația stabilită de P. D i m o în lucrarea *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat*, aplicată schemei din figura 7.

$$U^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - K_1^2 \sin^2 2\delta}}{2 \cdot K_1^2 \cdot \cos^2 \delta}$$

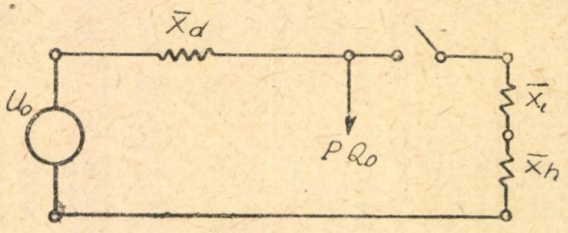

Fig. 7

X_d reprezintă reactanța de scurtcircuit trifazat la mersul în gol, privită din locul defectului,

X_i și X_h sunt reactanțele echivalente ale rețelei privite din locul unde va apare defectul,

P și Q_0 sunt puterile, respectiv activă și reactivă, ale consumatorului înainte de defect,

$$K_1 = 1 - \frac{q}{Q},$$

unde q este puterea reactivă suplimentară, datorită reactanței inverse și homopolare în serie și Q este puterea de scurtcircuit permanent trifazat la funcționarea în sarcină, δ este unghiul tensiunii din locul de defect, față de forța electromotoare, înainte de introducerea lui q suplimentar.

In lucrarea sa, P. D i m o a arătat că, în cazul puterilor active invariabile cu tensiunea, dacă se neglijează rezistențele, folosind criteriul $\frac{dQ}{dU}$, unghiul de 45° este un unghi limită al stabilității statice.

Să vedem care este limita stabilității statice, după criteriul $\frac{dP}{d\delta}$, în cazul puterilor reactive variabile cu U^2.

Pornind dela expresiile puterilor active și reactive în general,

$$P = \frac{EU}{Z}\sin(\delta+\alpha) - \frac{U^2}{Z}\sin\alpha$$

$$Q = \frac{EU}{Z}\cos(\delta+\alpha) - \frac{U^2}{Z}\cos\alpha;\ \operatorname{tg}\alpha = \frac{R}{X}$$

dacă

$$Q = \frac{U^2}{X_n},$$

obținem

$$U\left(\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha\right) = \frac{E}{Z}\cos(\alpha+\delta);$$

înlocuind tensiunea U în expresia puterii active, avem

$$P = \left(\frac{E}{Z}\right)^2 \cdot \frac{2\sin(\delta+\alpha)\cos(\delta+\alpha)}{2\left(\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha\right)} - \frac{E^2}{Z^2}\left(\frac{\cos^2(\delta+\alpha)}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}\right)^2\sin\alpha;$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \left(\frac{E}{Z}\right)^2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha} \cdot \frac{d}{d\delta}\cdot\left[\frac{\sin 2(\delta+\alpha)}{2} - \frac{\cos^2(\delta+\alpha)}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}\sin\alpha\right] = 0,$$

la limita stabilității statice.

Deci

$$\cos 2(\delta+\alpha) + \frac{2\cos(\delta+\alpha)\sin(\delta+\alpha)}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}\sin\alpha = \cos 2(\delta+\alpha) +$$

$$+ \frac{\sin 2(\delta+\alpha)}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}\sin\alpha = 0,$$

adică

$$\operatorname{tg} 2(\delta+\alpha) = -\frac{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}{\sin\alpha}$$

$$2(\delta+\alpha) = \operatorname{arc\,tg}\frac{-\left(\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha\right)}{\sin\alpha}$$

$$2(\delta+\alpha) = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arc\,tg}\frac{\sin\alpha}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha}$$

$$\delta_{max} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{\sin\alpha}{\frac{1}{X_n}+\frac{1}{Z}\cos\alpha} - \alpha,$$

sau

$$\delta_{max} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{\frac{R}{Z}}{\frac{X}{Z}\cdot\frac{1}{Z}+\frac{1}{X_n}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{\frac{R}{Z}}{\frac{X}{Z}}.$$

Deoarece în general $R \ll X$, putem neglija influența ultimilor doi termeni astfel încât $\delta_{max} = 45°$ și în acest caz.

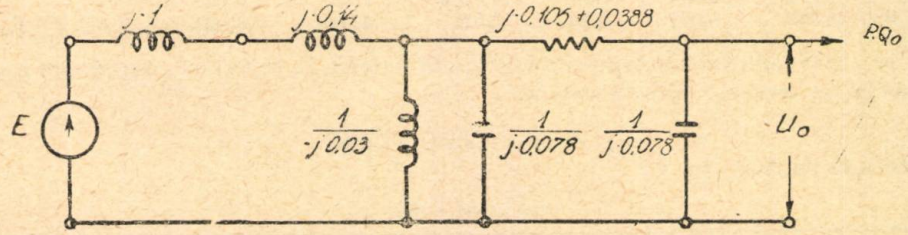

Fig. 8

Folosind metoda de calcul a tensiunii la variații permanente de sarcină reactivă, stabilită în lucrarea *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat*,

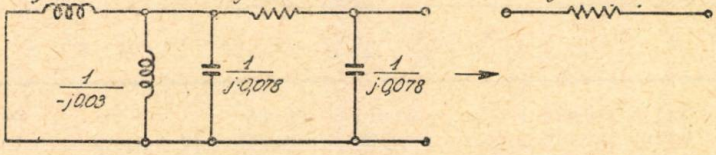

Fig. 9

vom calcula supratensiunea pentru diverse puteri în funcțiune. Pentru reactanța sincronă a generatorului, evaluăm aproximativ 180% la mersul în gol, 140% la mersul cu 1/2 sarcină și 100% la mersul în plină sarcină.

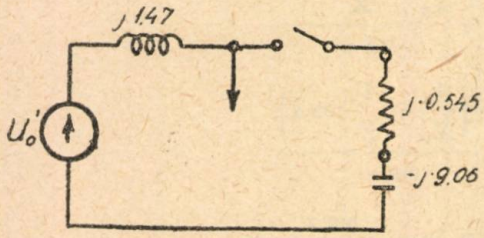

Fig. 10

Să considerăm cazul anterior, al unei uzine debitând printr'o linie de 110 kV. Fie puterea în funcțiune egală cu puterea naturală a liniei de 110 kV, adică aproximativ 30 MVA.

Schema de secvență directă va fi atunci cea din figura 8.

Impedanța directă echivalentă, privită din locul defectului, devine cea din figura 9.

Impedanțele echivalente inversă și homopolară fiind aproximativ aceleași ca în cazul anterior, pentru a utiliza relația stabilită în lucrarea *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat* de P. D i m o la schema din figura 10, vom alcătui tabloul Nr. 1.

TABLOUL Nr. 1

$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Q_0	$XI\cos\varphi$	$1+XI\sin\varphi$	$\operatorname{tg}\delta$	$Q=Q_0+\frac{1}{1,47}$	X_i	X_i+X_h
1	0	0	1,47	1	1,47	0,68	0,54	8,520
0,8	0,6	0,6	1,176	1,882	0,625	1,28	0,4	8,660
0,6	0,8	0,8	0,882	2,176	0,405	1,45	0,37	8,686

δ	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i+X_h}$	$1+K+K^2$	$\sqrt{1+K+K^2}$	$1-K$	E_p
45°	0,117	0,172	nestabil	—	—	—	—	—
32°	0,1154	0,094	1,16	0,0462	1,05	1,027	0,9538	2,06
22°10′	0,115	0,077	1,10	0,043	1,045	1,025	0,957	1,95

In cazul când sarcina reprezintă 50% din puterea în funcțiune, impedanța echivalentă de secvență directă devine

$$Z_d = j\ .\ 2{,}04 + 0{,}045$$

Alcătuim tabloul Nr. 2.

TABLOUL Nr. 2

$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Q_0	$XI\cos\varphi$	$1+XI\sin\varphi$	$\operatorname{tg}\delta$	δ	$Q=Q_0+\frac{1}{2,01}$	X_i
1	0	0	1,02	1	1	45°	0,49	0,54
0,8	0,6	0,3	0,816	1,612	0,505	26°50′	0,79	0,454
0,6	0,8	0,4	0,612	1,816	0,338	18°20′	0,89	0,434

X_i+X_h	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i+X_h}$	$1+K+K^2$	$\sqrt{1+K+K^2}$	$1-K$	E_p
— 8,52	0,117	0,239	1,68	0,0615	1,065	1,03	0,938	3
— 8,606	0,116	0,147	1,22	0,0528	1,0553	1,027	0,947	2,17
— 8,626	0,116	0,130	1,18	0,0503	1,053	1,025	0,949	2,09

c) Putere în funcțiune 15 MVA

Dacă puterea generatorilor în funcțiune este de 15 MVA, la funcționarea în gol avem schemele de secvență directă și inversă din figura 11.

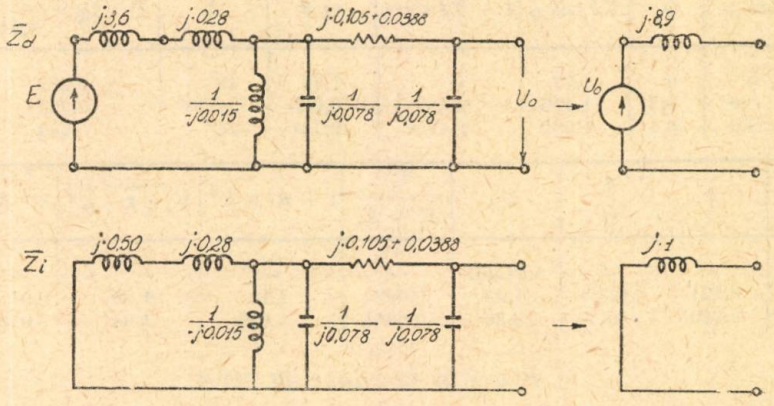

Fig. 11

Schema de secvență homopolară rămânând aceeași, avem

$$U_d = \frac{X_h + X_i}{X_h + X_i + X_d} = \frac{-9,06+1}{-9,06+1+8,9} = \frac{-8,06}{0,84} = -9,6$$

$$K = \frac{X_i}{X_h + X_i} = \frac{1}{8,06} = 0,124$$

$$U_{12} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 + K + K^2} \cdot U_d = 17,6.$$

Pentru funcționarea cu 50% sarcină, impedanța de secvență directă devine

$$\bar{Z}_d = j \,.\, 5,67 + 0,04.$$

Alcătuim tabloul Nr. 3.

TABLOUL Nr. 3

cos φ	sin φ	Q_0	XI cos φ	$1+XI$ sin φ	tg δ	δ	$Q=Q_0+\frac{1}{5,67}$	X_i
1	0	0	1,42	1	1,42	45°	0,176	—
0,8	0,6	0,25	1,136	1,852	0,614	31°30′	0,326	0,87
0,6	0,8	0,20	0,852	2,136	0,4	22°	0,376	0,83

$X_i + X_h$	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i + X_h}$	$1 + K + K^2$	$\sqrt{1+K+K^2}$	$1-K$	E_p
—	—	—	nestabil	—	—	—	—	—
− 8,18	0,122	0,374	1,78	0,106	1,1	1,05	0,9	3,24
− 8,23	0,1216	0,324	1,54	0,101	1,1	1,05	0,9	2,80

Pentru funcționarea în plină sarcină avem

$$\bar{Z}_d = j \,.\, 3,54 + 0,04.$$

Alcătuim tabloul Nr. 4.

TABLOUL Nr. 4

$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Q_0	$XI\cos\varphi$	$1 + XI\sin\varphi$	$\operatorname{tg}\delta$	δ	$Q = Q_0 + \frac{1}{3,54}$	X_i
1	0	0	1,77	1	1,77	45°	0,282	1
0,8	0,6	0,3	1,416	2,062	0,685	34°30′	0,582	0,763
0,6	0,8	0,4	1,062	2,416	0,441	24°	0,682	0,714

$X_i + X_h$	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i + X_h}$	$1 + K + K^2$	$\sqrt{1+K+K^2}$	$1-K$	E_p
—	—	—	nestabil	—	—	—	—	—
− 8,297	0,121	0,208	1,42	0,092	1,1	1,05	0,91	2,58
− 8,246	0,1225	0,178	2,26	0,0866	1,093	1,04	0,9134	2,27

d) Putere în funcțiune 40 MVA

La funcționarea în gol, vom avea schemele de secvență din figura 12.

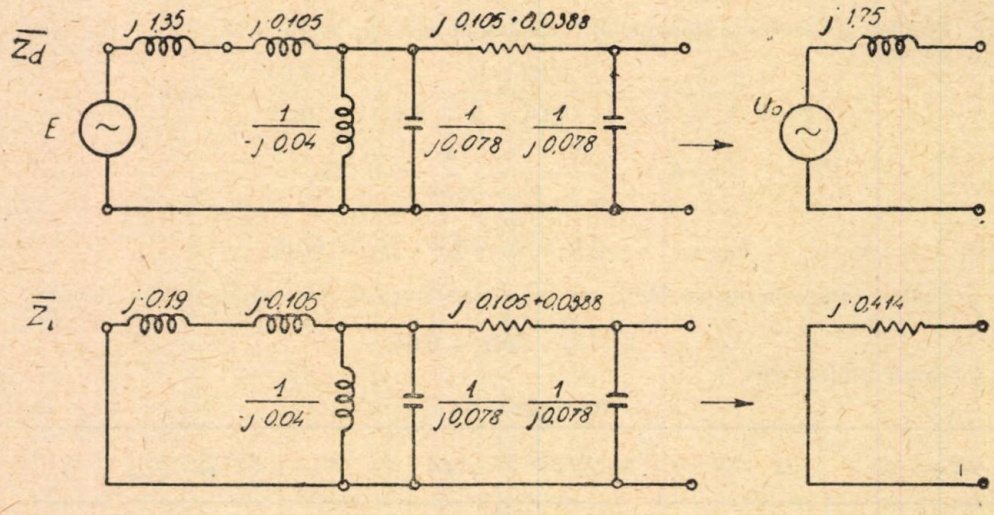

Fig. 12

In cazul unei puneri la pământ la capătul receptor, impedanța homopolară rămânând aceeași, avem

$$U_d = \frac{X_h + X_i}{X_h + X_i + X_d} = \frac{8,46}{6,896} = 1,23$$

$$K = \frac{X_i}{X_i + X_h} = \frac{0,414}{8,46} = 0,049$$

$$E_p = U_{13} = U_{12} = \sqrt{3}\, U_d \sqrt{1 + K + K^2} = \sqrt{3} \cdot 1,23 \cdot 1,025 = 2,19$$

$$U_{23} = \sqrt{3} \cdot U_d (1 - K) = \sqrt{3} \cdot 1,23 \cdot 0,95 = 2,02.$$

Pentru funcționarea cu 50% sarcină avem

$$\overline{Z}_d = j\,1{,}41 + 0{,}04.$$

Alcătuim tabloul Nr. 5.

TABLOUL Nr. 5

$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Q_0	$XI\cos\varphi$	$1 + XI\sin\varphi$	$\operatorname{tg}\delta$	δ	$Q = Q_0 + \frac{1}{1{,}41}$	X_i
1	0	0	0,845	1	0,845	40°	0,71	0,414
0,8	0,6	0,4	0,675	1,5057	0,448	24°	1,11	0,356
0,6	0,8	0,535	0,5075	1,675	0,303	17°	1,246	0,339

$X_i + X_h$	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i + X_h}$	$1 + K + K^2$	$1 - K$	E_p
− 8,646	0,116	0,1635	1,36	0,048	1,05	0,952	2,4
− 8,704	0,115	0,1035	1,16	0,0409	1,042	0,959	2,05
− 8,721	0,115	0,0922	1,12	0,039	1,041	0,961	1,98

Pentru funcționarea în plină sarcină avem

$$\overline{Z}_d = j\,1{,}07 + 0{,}04.$$

Alcătuim tabloul Nr. 6.

TABLOUL Nr. 6

$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Q_0	$XI\cos\varphi$	$1 + XI\sin\varphi$	$\operatorname{tg}\delta$	δ	$Q = Q_0 + \frac{1}{1{,}07}$	X_i
1	0	0	1,43	1	1,43	45°	0,93	0,414
0,8	0,6	0,8	1,14	1,856	0,614	31°30′	1,73	0,311
0,6	0,8	1,07	0,856	2,14	0,4	21°50′	2	0,287

$X_i + X_h$	q	$\frac{q}{Q}$	U_d	$\frac{X_i}{X_i + X_h}$	$1 + K + K^2$	$1 - K$	E_p
—	—	—	—	—	—	—	—
− 8,749	0,1145	0,0662	1,08	0,0356	1,04	0,98	1,91
− 8,773	0,114	0,057	1,07	0,0328	1,04	0,98	1,89

Rezultatele obținute anterior conduc prin interpolare la curbele din figura 13.

In abscisă s'a luat raportul dintre sarcina generatorului echivalent în funcțiune și puterea sa nominală $\frac{S_c}{S_n}$.

In ordonată s'a luat supratensiunea rezultată în unități relative, în urma punerii unei faze la pământ.

Graficele sunt pentru diverşi cos φ şi diverse puteri în funcţiune. Se observă că supratensiunea prelungită mai mare ca de două ori tensiunea simplă este aproape

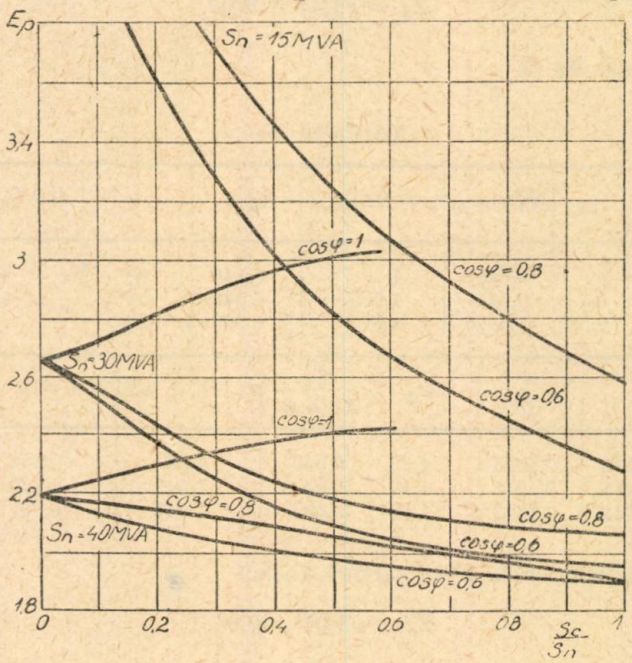

Fig. 13

generală. Supratensiunea creşte cu cât sarcina reactivă este mai mică $\left(\frac{S_c}{S_n}\right.$ mic şi cos φ bun) şi cu cât puterea generatorilor în funcţiune este mai aproape de cea pentru care avem rezonanţă. Se poate ajunge chiar la rezonanţă pentru un anumit S_n mai mic dar apropiat de 15 MVA în funcţiune.

2. LINIE DE 220 KV

Considerăm cazul unui transport de energie electrică dela o centrală de 125 MVA, printr'o linie de 220 kV (250 km), conform schemei din figura 14.

Am considerat: generatorul G cu $\varepsilon_d = 150\%$ şi $\varepsilon_i = 25\%$ la mersul în gol, iar la funcţionarea în sarcină cu $\varepsilon_d = 120\%$ şi $\varepsilon_i = 25\%$, transformatorul T cu $\xi = 15\%$ şi $i_0 = 3\%$, linia L, trifazică cu conductori de oţel-aluminiu de 300 mm², aşezaţi pe stâlpi portal, cu

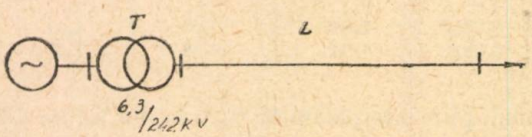

Fig. 14

$r = 0{,}105\ \Omega/\text{km}$
$x = 0{,}422\ \Omega/\text{km}$
$x_h = 1{,}2\Omega/\text{km}$
$c = 8{,}4 \cdot 10^{-9}\ \text{F/km}$
$c_h = 5{,}47 \cdot 10^{-9}\ \text{F/km}$

Curentul capacitiv de punere la pământ rezultă

$$I_c \cong \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 5{,}47 \cdot 10^{-9} \cdot 250 \cdot 314 = 163\ \text{A}.$$

Cu aceasta, în mod analog, s'au calculat valorile din tabloul Nr. 7.

TABLOUL Nr. 7

$\frac{S_c}{S_n}$	cos φ	E_p
0	—	9,7
0,5	0,8	2,97
	0,6	2,66
1	0,8	2,67
	0,6	2,38

Se poate astfel trasa graficul din figura 15.

Spre deosebire de cazul anterior al liniei la 110 kV, supratensiunea are aici valori mai mari, mai ales la sarcină redusă, care face imposibilă funcționarea rețelei cu punere accidentală a unei faze la pământ (în cazul neutrului izolat).

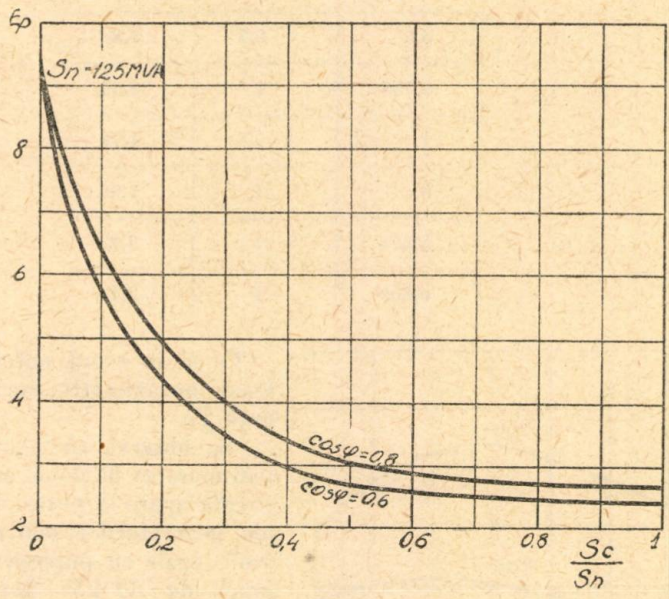

Fig. 15

Pentru puteri în funcțiune mai mici decât 125 MVA, supratensiunile vor fi evident mai mari, ca și în cazul linei de 110 kV, până la rezonanță.

3. LINIE DE 60 KV

In mod analog, vom considera o linie de 60 kV (60 km), prin care debitează un generator echivalent (fig. 16).

Pentru generator și transformatori am considerat aceleași reactanțe și admitanțe procentuale ca în cazul rețelei de 110 kV.

Linia, formată din trei conductori cablați oțel-aluminiu așezați pe stâlpi portal, are

$r = 0{,}45\ \Omega/\text{km}$
$x = 0{,}44\ \Omega/\text{km}$
$c = 8{,}24 \cdot 10^{-9}\ \text{F/km}$
$c_h = 5{,}4 \cdot 10^{-9}\ \text{F/km}$
$x_h = 1{,}45\ \Omega/\text{km}$

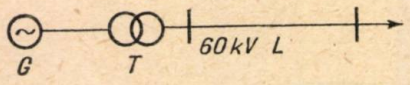

Fig. 16

Curentul capacitiv de punere la pământ rezultă

$$I \cong \sqrt{3} \cdot U \cdot c_h \cdot l \cdot \omega = \sqrt{3} \cdot 60 \cdot 5{,}4 \cdot 10^{-9} \cdot 60 \cdot 314 = 10{,}6\ \text{A}.$$

Cu acestea s'au obținut valorile din tabloul Nr. 8.

TABLOUL Nr. 8

S_n MVA	$\frac{S_c}{S_n}$	cos φ	E_p
5	0		2,24
	0,52	1	2,68
	0,5	0,8	1,8
	0,738	1	2,44
	1	0,8	1,78
10	0	1	1,95
	0,578	1	2,23
	0,833	1	2,14

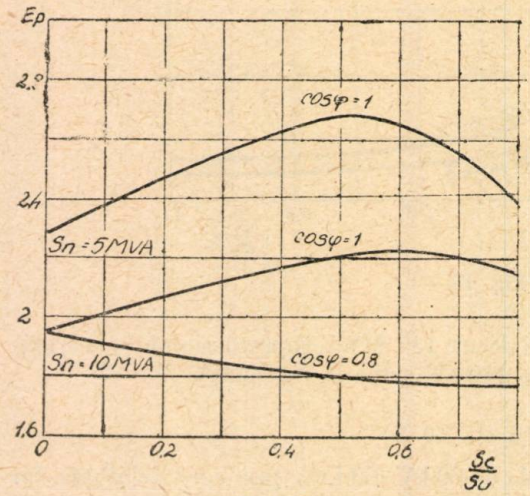

Fig. 17

Ca și în cazul anterior, se pot trasa aproximativ curbele din figura 17.

Se observă că o supratensiune mai mare ca de două ori tensiunea simplă apare la puteri în funcțiune ale generatorilor mai mici sau cel mult egale cu puterea naturală a liniei de 60 kV. Supratensiunile sunt aici, în mod normal, comparativ mai mici ca la 110 kV.

4. REȚEA DE 35 KV FORMATĂ DIN LINII AERIENE

Să considerăm o centrală de 30 MVA dela care pornesc zece linii de câte 30 km la 35 kV (fig. 18).

Generatorii și tranformatorii au aceleași reactanțe procentuale ca și anterior, iar linia formată din trei conductori cablați — M_{35}, așezați pe stâlpi portal are

$$r = 0{,}54\ \Omega/\text{km}$$
$$x = 0{,}45\ \Omega/\text{km}$$
$$x_h = 1{,}49\ \Omega/\text{km}$$
$$c = 8{,}066.10^{-9}\ \text{F/km}$$
$$c_h = 5{,}3.10^{-9}\ \text{F/km}$$

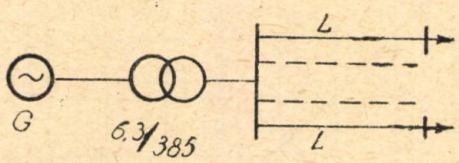

Fig. 18

Curentul capacitiv de punere la pământ va fi

$$I_c \cong \sqrt{3}.U.c_h.l.\omega = \sqrt{3}.35 \cdot 10^3.5{,}3.10^{-9}.300.314 = 30{,}2\ \text{A}.$$

Calculând, găsim valorile din tabloul Nr. 9.

TABLOUL Nr. 9

S_n MVA	$\frac{S_c}{S_n}$	cos φ	E_p
30	0		1,82
	0,5	1	1,96
	0,833	1	1,98
15	0		1,95
	0,588	1	2,25
	0,81	1	2,13
10	0		2,17
	0,5	1	2,3
	0,78	1	2,43
5	0		4,05
	0,4	1	3,2
	0,645	1	3,07

Ca şi anterior, obţinem reprezentarea din figura 19.

Se observă că o supratensiune mai mare ca de două ori tensiunea simplă apare obişnuit la o putere în funcţiune a generatorilor mai mică decât 15 MVA.

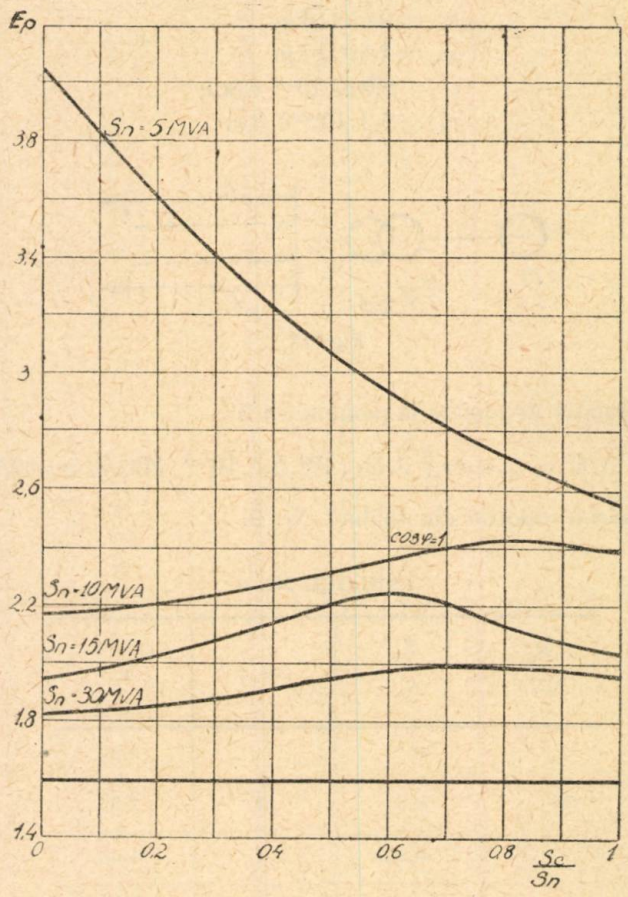

Fig. 19

Reţelele de 35 kV, cu generatori de puteri mari, ar putea funcţiona cu neutrul izolat, neexistând pericolul supratensiunilor de această natură.

5. REŢEA DE 35 KV FORMATĂ DIN LINII ŞI CABLURI

Să considerăm cazul unei reţele de 35 kV, compusă din cinci linii aeriene de câte 30 km şi un cablu de 10 km (fig. 20).

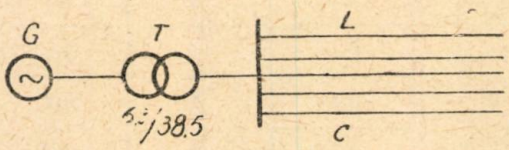

Fig. 20

TABLOUL Nr. 10

S_n MVA	$\frac{S_c}{S_n}$	cos φ	E_p
30	0		1,98
	0,614	1	2,28
	1	0,8	1,88
	0,833	1	2,16
	1	0,8	1,84
15	0		2,45
	0,56	1	2,84
	0,5	0,8	2,1
	0,782	1	2,56
	1	0,8	2.02
10	0		3,35
	0,51	1	3,65
	0,5	0,8	2,2

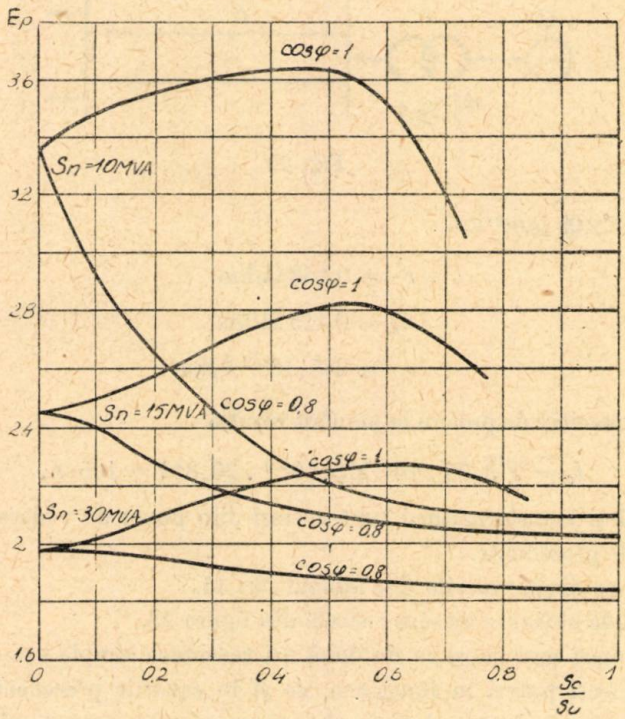

Fig. 21

Liniile au aceleaşi constante ca şi în cazul anterior.
Cablul de 3×95 mm² are

$$r = 0{,}188\ \Omega/\text{km}$$
$$x_L = 0{,}115\ \Omega/\text{km}$$
$$c = 275.10^{-9}\ \text{F/km}$$

Curentul capacitiv de punere la pământ va fi

$$I_c \cong \sqrt{3}.35 \cdot 10^3\ (275.10 + 5{,}3.150).10^{-9} \cdot 314 = 67{,}5\ \text{A}.$$

Generatorii şi transformatorii sunt aceiaşi ca şi în cazul precedent.
Calculând ca şi anterior avem valorile din tabloul Nr. 10.

Cu rezultatele obţinute trasăm aproximativ curbele din figura 21.
Curentul homopolar de punere la pământ fiind mai mare, plafonul supratensiunilor prelungite este mai mare ca anterior.

6. REŢEA DE 35 KV FORMATĂ DIN DOUĂ CABLURI

Dela aceeaşi centrală pornesc două cabluri de câte 10 km (fig. 22).

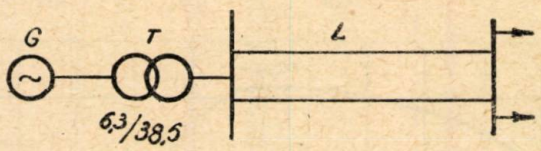

Fig. 22

Cablul de 3×95 mm² are

$$r = 0{,}188\ \Omega/\text{km}$$
$$x_L = 0{,}115\ \Omega/\text{km}$$
$$c = 275.10^{-9}\ \text{F/km}$$

Curentul capacitiv de punere la pământ rezultă

$$I_c \cong \sqrt{3}.35 \cdot 10^3.275.10^{-9} \cdot 20.314 = 105\ \text{A}.$$

Generatorii şi transformatorii sunt aceiaşi din punct de vedere al reactanţelor ca şi în cazurile precedente.

Calculând, se obţin valorile din tabloul Nr. 11.

Cu rezultatele obţinute trasăm curbele din figura 23.

Supratensiunea mai mare ca de două ori tensiunea simplă este aici obişnuită.

Pentru aceleaşi puteri în funcţiune, ca şi în cazurile precedente ale reţelelor de 35 kV, capacitatea homopolară fiind mai mare acum, supratensiunile sunt mai mari.

TABLOUL Nr. 11

S_n MVA	$\frac{S_c}{S_n}$	cos φ	E_p
30	0		2,18
	0,535	1	2,5
	0,5	0,8	1,98
	0,82	1	2,37
	1	0,8	1,97
15	0		3,31
	0,54	1	3,5
	0,5	0,8	2,3
	0,768	1	3
	1	0,8	2,09

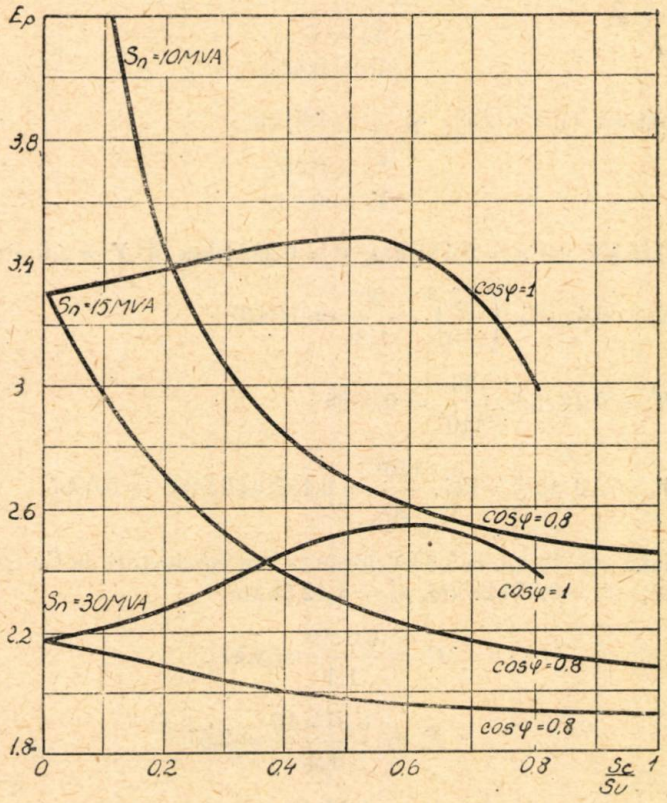

Fig. 23

7. REȚEA DE 5 KV

Să considerăm cazul unei rețele ca în figura 24.

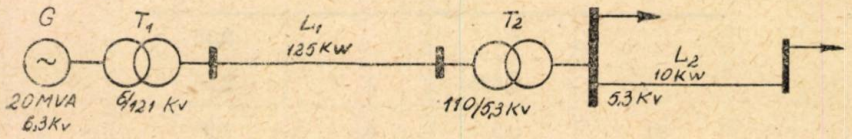

Fig. 24

a) Puterea în funcțiune 20 MVA

Un hidrogenerator echivalent de 20 MVA debitează printr'o linie de 110 kV și o rețea de cabluri și linii aeriene la 5,3 kV.

Luăm ca mărimi (unități) de bază $S_b = 20$ MVA și $U_b = 5{,}3$ kV. Rezultă

$$Z_b = \frac{5{,}3^2}{20} = 1{,}4.$$

Considerând pentru generator $\varepsilon_d = 100\%$ și $\varepsilon_i = 40\%$ avem

$$X_d = 1$$
$$X_i = 0{,}4.$$

Transformatorii cu $\varepsilon = 15\%$ și $i_0 = 3\%$ au

$$X_t = 0{,}15$$
$$Y_t = 0{,}03.$$

Linia de 110 kV, cu $x = 0{,}4\,\Omega$/km, $r = 0{,}24\,\Omega$/km și $Y = 2{,}6.10^{-6}\ S$/km are

$$X_1 = 0{,}4.125.\left(\frac{5{,}3}{110}\right)^2 . \frac{20}{5{,}3^2} = 0{,}0826$$

$$R_1 = 0{,}24.125.\frac{20}{110^2} = 0{,}0495$$

$$Y_1 = 2{,}6.10^{-6} . 125.\frac{110^2}{20} = 0{,}197 = 0{,}0985 + 0{,}0985.$$

Linia aeriană de 10 km la 5,3 kV formată din conductori de Cu de 35 mm² are $r' = 0{,}5\,\Omega$/km, $x' = 0{,}374\,\Omega$/km, $x'_h = 1{,}12\,\Omega$/km

$$R = \frac{0{,}5.10}{1{,}4} = 3{,}57$$

$$X = \frac{0{,}374.10}{1{,}4} = 2{,}67$$

$$X_h = \frac{1{,}12.10}{1{,}4} = 8.$$

Admițând pentru rețeaua de cabluri în curent capacitiv de punere la pământ $I_0 = 245$ A, rezultă pentru reactanța homopolară

$$X_h = \frac{\sqrt{3}.U}{I_0}.$$

In unități relative,

$$U = 1,$$

iar

$$I_0 = \frac{254}{\frac{20}{5,3} \cdot 10^3} = 0,0647.$$

Deci

$$X_h = 26,75.$$

In cazul unei puneri la pământ la capătul liniei aeriene de 5 kV, considerând funcționarea în gol, avem schemele de secvență din figura 25.

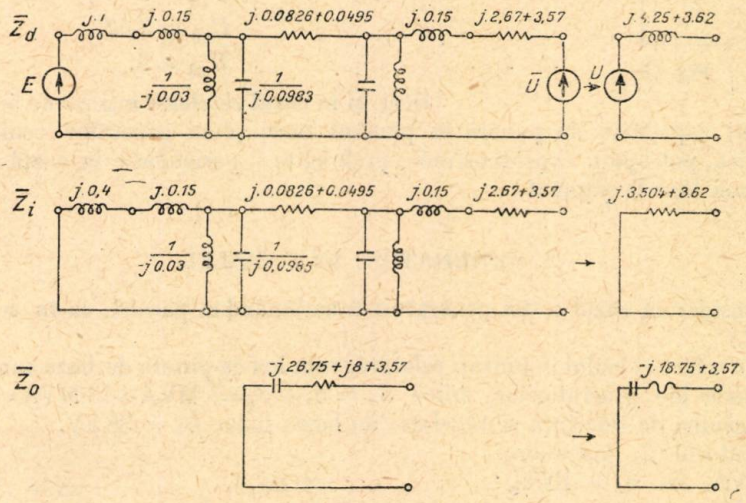

Fig. 25

Reunind schemele de secvență, obținem figura 26.
Cu valorile elementelor schemei anterioare calculăm

$$\bar{Z}_h + \bar{Z}_i = 7,19 - j.15,25$$

$$\bar{Z}_h + \bar{Z}_i + \bar{Z}_d = 10,76 - j.11$$

$$U_d = \frac{7,19 - j.15,25}{10,76 - j.11} = 1,1\,|\underline{\alpha_d}$$

$$U_i = \frac{3,619 + j.3,5}{10,76 - j.11} = 0,327\,|\underline{\alpha_i}$$

$$U_h = \frac{-j\,18,75 + 3,57}{10,76 - j.11} = 1,34\,|\underline{\alpha_h}$$

Cu acestea, pentru tensiunile compuse, obținem (grafic sau analitic) valorile

$$U_{12} = 1{,}58$$
$$U_{23} = 1{,}84$$
$$U_{13} = 2{,}48.$$

Se observă o importantă disimetrie a tensiunilor compuse, în cazul când rezistența nu este neglijabilă.

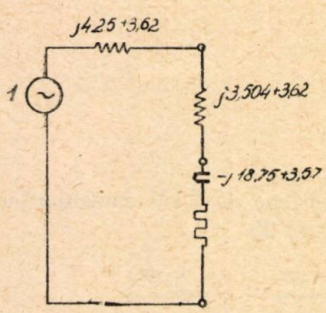

Fig. 26

In acest caz, dacă regulatorul de tensiune ar fi legat la U_{12}, influența sa ar fi defavorabilă deoarece el ar acționa în sensul creșterii tensiunii generale.

b) Puterea în funcțiune 5 MVA

Analog se obține

$$U_{12} = 2$$
$$U_{13} = 3{,}42$$
$$U_{23} = 2.$$

Deci, și în cazul rețelelor întinse de 5 sau 6 kV, cu curenți capacitivi de punere la pământ mari și cu generator echivalent de putere mică, pot apare supratensiuni « prelungite », periculoase în cazul unui contact al unei faze la pământ.

8. GENERATORI ÎN PARALEL

Să considerăm cazul a doi generatori funcționând în paralel, ca în schema din figura 27.

Pentru a face calculul în unități relative, vom lua ca putere de bază suma puterilor nominale ale generatorilor, adică $S_b = S_1 + S_2 = 5$ MVA $+ 13$ MVA $= 18$ MVA.

Ca tensiune de referință și tensiune de bază, luăm $U_b = 38$ kV.

Generatorul G_1 hidraulic, de 5 MVA, cu $\varepsilon_d = 100\%$ și $\varepsilon_i = 30\%$ are

$$X_d = \frac{100}{100} \cdot \frac{18}{5} = 3{,}6$$

$$X_i = \frac{30}{100} \cdot \frac{18}{5} = 1{,}08.$$

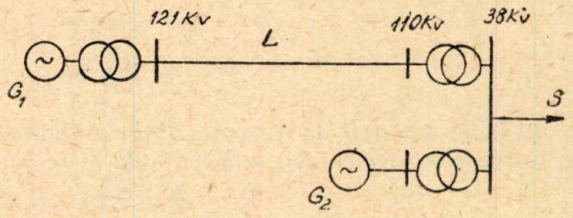

Fig. 27

Transformatorul său, cu $\varepsilon = 10\%$ și $i_0 = 3\%$ are

$$X_t = \frac{10}{100} \cdot \frac{18}{5} = 0{,}36$$

$$Y_t = \frac{3}{900} \cdot \frac{5}{18} = 0{,}00833.$$

Linia L de 125 km la 110 kV are

$$r = 0{,}24\ \Omega/\text{km}$$
$$x = 0{,}4\ \Omega/\text{km}$$
$$y = 2{,}6 \cdot 10^{-6}\ \text{S/km}.$$

In unități relative la tensiunea de referință și pentru întreaga lungime a liniei, avem

$$R = 0{,}24 \cdot 125 \cdot \left(\frac{38}{110}\right)^2 \cdot \frac{18}{38^2} = 0{,}0446$$

$$X = 0{,}4 \cdot 125 \cdot \frac{18}{110^2} = 0{,}0745$$

$$Y = 2{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 125 \cdot \frac{110^2}{18} = 0{,}218.$$

Transformatorul coborîtor al liniei de 15 MVA, cu $\varepsilon = 10\%$ și $i_0 = 3\%$, are

$$X_t = \frac{10}{100} \cdot \frac{18}{15} = 0{,}12$$

$$Y_t = \frac{3}{100} \cdot \frac{15}{18} = 0{,}025.$$

Generatorul G_2 de 13 MVA, cu $\varepsilon_d = 140\%$ și $\varepsilon_i = 25\%$ are

$$X_d = \frac{140}{100} \cdot \frac{18}{13} = 1{,}94$$

$$X_i = \frac{25}{100} \cdot \frac{18}{13} = 0{,}346.$$

Transformatorul său, cu $\varepsilon = 7{,}4\%$ și $i_0 = 3\%$ are

$$X_t = \frac{7{,}4}{100} \cdot \frac{18}{13} = 0{,}1025$$

$$X_t = \frac{3}{100} \cdot \frac{13}{18} = 0{,}0217.$$

Cu acestea, obținem schemele de secvență Z_d, Z_i (fig. 28).

Vom considera mai multe cazuri în funcționare.

Presupunem G_1 funcționând în gol, iar G_2 în plină sarcină, adică $G_2 = 13$ MVA la $\cos\varphi = 0{,}9$.

In unități relative avem

$$P_2 = \frac{13 \cdot 0{,}9}{18} = 0{,}652$$

$$Q_2 = \frac{13 \cdot 0{,}436}{18} = 0{,}315.$$

Rezultă

$$E_2^2 = (1 + X_2 Q_2)^2 + (X_2 P_2)^2 = (1 + 1{,}96 \cdot 0{,}315)^2 + (1{,}96 \cdot 0{,}652)^2 = 4{,}24$$

$$E_2 = 2{,}06$$

$$E_2 Y_2 = \frac{E_2}{X_2} = \frac{2{,}06}{1{,}96} = 1{,}05$$

$$E_1 Y_1 = \frac{E_1}{X_1} = \frac{1}{15{,}12} = 0{,}066.$$

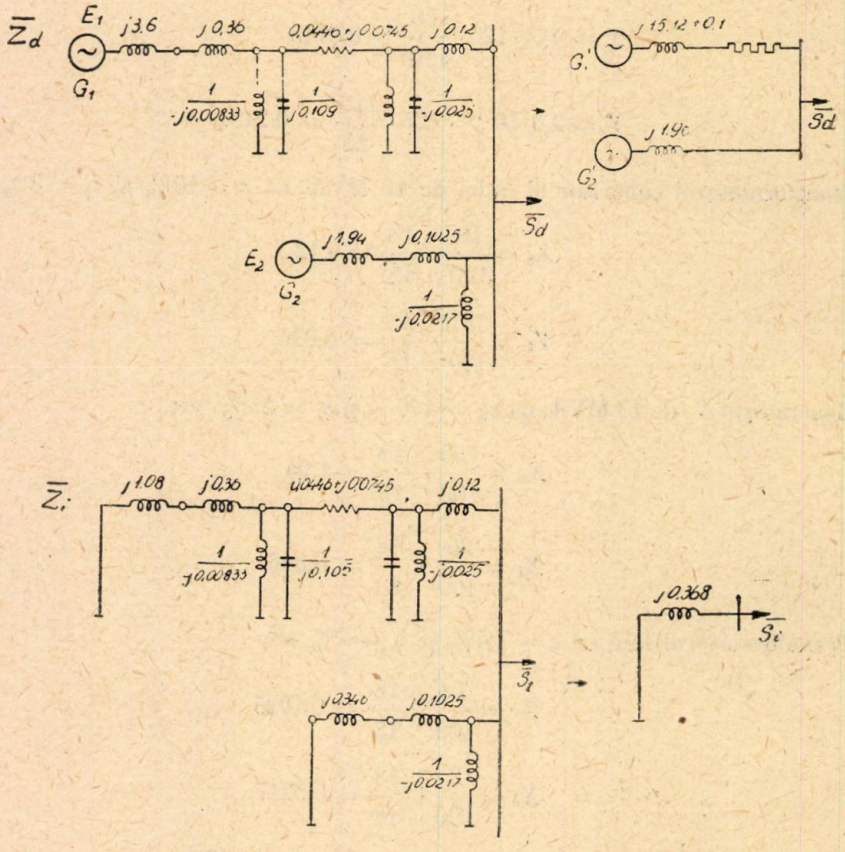

Fig. 28

Pentru un curent capacitiv de punere la pământ

$$I_c = 100 \text{ A}.$$

Avem în unități relative

$$q = \frac{I_c}{\sqrt{3} \cdot I_b} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 474} = 0{,}122\,; \text{ iar } X_h = 8{,}2.$$

Considerând pentru consumatori o reactanță inversă egală cu cea directă, avem reactanța inversă a rețelei

$$X_i = \frac{0{,}368 \cdot \dfrac{1}{0{,}315}}{0{,}368 + \dfrac{1}{0{,}315}} = 0{,}33.$$

Deci $$q = \frac{1}{8{,}2 - 0{,}33} = 0{,}127.$$

Cu acestea, construim graficul din figura 29 [1]).

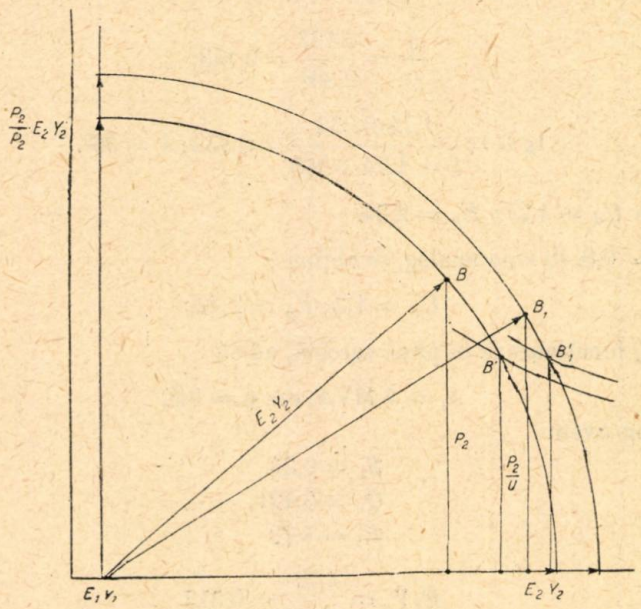

Fig. 29

In urma unei puneri la pământ, funcționarea se va schimba din B în punctul B' de intersecție a curbei puterilor constante, cu hiperbola $\frac{P}{U}(Q - q)\,U = \text{ct.}$

Făcând raportul ordonatelor punctelor B și B', se găsește noua componentă directă a tensiunii.

$$U_d = 1{,}34 \qquad K = \frac{X_i}{-X_i + X_h} = \frac{0{,}33}{-0{,}33 + 8{,}2} = 0{,}042.$$

Deci

$$E_p = U_d \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 + K + K^2} = 2{,}37.$$

[1]) Acest volum, P. D i m o, *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat*, punctul XI.

In mod analog, pentru $S_2 = 13$ MVA și $\cos \varphi = 0{,}8$ (punctele B_1 și B_1' în figura 29) se găsește

$$U_d = 1{,}22 \qquad E_p = 2{,}16.$$

Considerând un singur generator echivalent, vom avea pentru reactanța directă

$$X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} = \frac{1{,}96 \cdot 15{,}12}{15{,}12 + 1{,}96} = 1{,}74.$$

Celelalte scheme de secvență rămânând aceleași, pentru $\cos \varphi = 0{,}9$ avem

$$Q = \frac{1}{1{,}74} + 0{,}315 = 0{,}891$$

$$\frac{q}{Q} = \frac{0{,}127}{0{,}891} = 0{,}143$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1{,}74 \cdot 0{,}652}{1 + 1{,}74 \cdot 0{,}315} = 0{,}732; \quad \delta = 36°.$$

Se găsește $U_d = 1{,}27$; $E_p = 2{,}24$.

La $\cos \varphi = 0{,}8$, în mod analog, se obține

$$U_d = 1{,}2; \quad E_p = 2{,}12.$$

Dacă și G_1 funcționează în plină sarcină, adică

$$S_1 = 5 \text{ MVA}, \cos \varphi = 0{,}9,$$

în mod analog avem

$$S_1 = 0{,}25$$
$$Q_1 = 0{,}121$$
$$E_1 = 4{,}72$$

$$E_1 Y_1 = \frac{4{,}72}{15{,}12} = 0{,}312.$$

Se construesc elipsele care au ca axe mari respectiv

$$\frac{P}{P_1} E_1 Y_1 = \frac{0{,}902}{0{,}25} \cdot 0{,}312 = 1{,}125$$

și

$$\frac{P}{P_2} E_2 Y_2 = \frac{0{,}902}{0{,}652} \cdot 1{,}05 = 1{,}45,$$

unde

$$P = P_1 + P_2 = 0{,}25 + 0{,}652 = 0{,}902,$$

iar ca axe mici respectiv

$$E_1 Y_1 = 0{,}312$$

și

$$E_2 Y_2 = 1{,}05.$$

Se adună abscisele corespunzătoare aceleiași ordonate și se găsește curba generatorului echivalent (fig. 30).

Punctul B de funcționare normală se va deplasa în B', în cazul unei puneri la

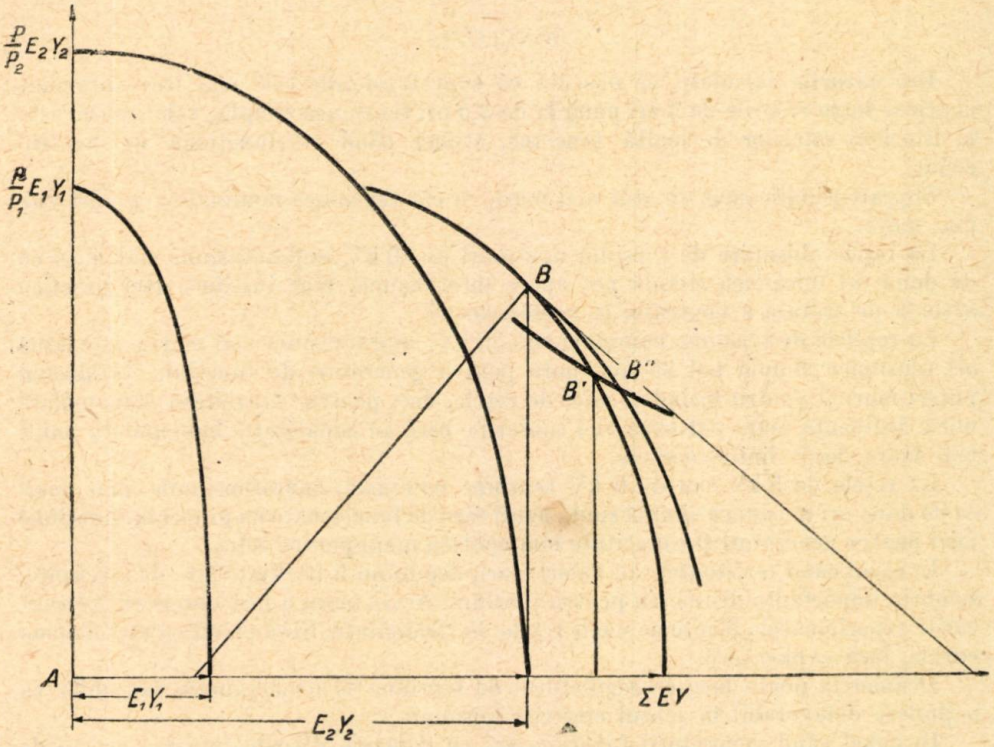

Fig. 30

pământ. Acest nou punct se găsește la intersecția hiperbolei $\frac{P}{U}(Q-q)\ U = \text{ct}$ cu curba generatorului echivalent [1]).

Se găsește

$$U_d = 1{,}3 \qquad E_p = 2{,}3.$$

La limita stabilității statice [2]) (punctul B''), făcând raportul ordonatelor punctului B și B'', avem

$$U_d = 1{,}38 \qquad E_p = 2{,}44.$$

Cu un singur generator echivalent se obțin

$$U_d = 1{,}28 \qquad E_p = 2{,}26.$$

Comparând rezultatele, se observă că în cazul mai puțin exact al considerării unui singur generator echivalent, se obțin valori mai mici de supratensiune.

---

[1]) Acest volum, P. Dimo, *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat.*

[2]) Acest volum, P. Dimo, *Cauza supratensiunilor «prelungite» în rețelele cu neutru izolat,* punctul XIII.

Eroarea este cu atât mai mare, cu cât unghiurile de defazaj ale generatorilor în paralel sunt mai diferite.

Cazurile considerate anterior ne dau deci valori ceva mai mari de supratensiune, dacă generatorii funcționează încărcați neproporțional.

CONCLUZII

Din cazurile calculate, se observă că supratensiunile cele mai frecvente sunt cuprinse între valorile de 2 ori până la de 3,5 ori tensiunea simplă, valori observate în istoricul rețelelor de înaltă tensiune, atunci când se funcționa cu neutrul izolat.

Supratensiunile sunt cu atât mai mari, cu cât tensiunea nominală a rețelei este mai mare.

La rețele obișnuite de tensiuni mai mari ca 60 kV, supratensiuni mai mari ca de două ori tensiunea simplă pot apare întotdeauna. S'ar justifica deci practica actuală de tratare a neutrului în aceste cazuri.

La rețelele de tensiune nominală sub 35 kV, supratensiuni mai mari ca de două ori tensiunea simplă pot să nu apară pentru generatori de funcțiune totalizând puteri mari și pentru întinderi mici de rețele, deci pentru capacitate homopolară mică. Influență mare pot avea aici cablurile care au capacitate homopolară mult mai mare decât liniile aeriene.

La rețele de 5 kV sau de 6 kV tensiune nominală, supratensiunile mai mari ca de două ori tensiunea simplă sunt cazuri rare de funcționare cu puteri în funcțiune mici pentru generatori și capacitate homopolară mare pentru rețea.

In cazul când rezistențele au valori mari, neputând fi neglijate față de reactanțe, se obțin importante disimetrii pentru tensiuni. Acest lucru a fost observat la încercările experimentale făcute pe unele rețele, în străinătate, fiind privit ca un fenomen curios, fără explicație[1]).

Disimetria poate face ca regulatorul de tensiune să nu acționeze sau chiar să acționeze defavorabil în sensul creșterii tensiunii.

In cazul când generatorii funcționează cu defazaje diferite față de punctul de defect, calculul supratensiunii, considerând un singur generator echivalent pentru toată rețeaua, nu este exact, dând valori mai mici decât cele reale.

In concluzie, dacă, după cum s'a observat în unele experiențe, curentul de punere la pământ nu prezintă întreruperi, explicația dată în lucrarea *Cauza supratensiunilor « prelungite » în rețelele cu neutru izolat* este singura posibilă.

Spre deosebire de celelalte, ea nu este o simplă ipoteză care să explice fenomenul numai calitativ; ea oferă mijloace practice ușoare de apreciere cantitativă a supratensiunilor de durată, așa cum s'a făcut în această lucrare.

РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКА ДЛИТЕЛЬНОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ВОЗМОЖНОГО, В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ РЕЗОНАНСА, В СЛУЧАЕ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Вычисляются различные типы электросетей с изолированной нейтралью в случае аварийной работы сети, когда один из фазовых прово-

[1]) C.I.G.R.E., 1948, Raportul Nr. 312, *referitor la Comportarea arcului electric de punere la pământ în rețeaua de 45 kV, « Forces Motrices Bernoises »*.

дов заземлен, причем применяется метод симметричных слагающих, с целью нахождения внутреннего перенапряжения на основании нового объяснения, опубликованного в труде П. Димо «Причина длительных перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью».

Рассмортены сети на 110, 220, 60, 35 и 5 кв для различной номинальной мощности работающих генераторов и различных нагрузок потребления.

Полученные результаты сходятся, с точки зрения порядка их величины, с результатами наблюдения на практике высоковольтных цепей, работающих с изолированной нейтралью, а также с данными опытов, произведенных в прошлом над некоторыми сетями, при искании объяснения этого явления на основании «перемежающейся дуги».

LA VÉRIFICATION PAR LE CALCUL DE LA SURTENSION PROLONGÉE, POSSIBLE DANS L'HYPOTHÈSE DE LA RÉSONANCE, POUR DES RÉSEAUX DONT LE NEUTRE EST ISOLÉ

(RÉSUMÉ)

En vue de trouver la surtension interne qui prend naissance, d'après la nouvelle interprétation donnée par le travail de P. Dimo *La cause des surtensions prolongées » dans les réseaux dont le neutre est isolé*, on a calculé, à l'aide de la méthode des composantes symétriques, différents types de réseaux dont le neutre est isolé, dans le fonctionnement accidentel, avec l'une des phases reliée à la terre (au sol).

On y inclut des réseaux de 110 kV, 220 kV, 60 kV, 35 kV et 5 kV, pour les diverses puissances nominales des générateurs en fonction et diverses charges des consommateurs.

Les valeurs obtenues coïncident, quant à l'ordre de la grandeur, avec celles que l'on a observées dans la pratique des réseaux à haute tension, lorsque le fonctionnement avait lieu avec le neutre isolé, ainsi qu'avec les données des expériences exécutées dans le passé, sur certains réseaux, alors qu'on cherchait l'explication de « l'arc intermittent ».

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ELECTROENERGETICĂ

ÎNCĂLZIREA LA SCURTCIRCUITE A CONDUCTORILOR DE ALUMINIU

DE

A. AVRAMESCU şi S. MASTERO

A. PREMISE

1. Obiective

Introducerea pe o scară largă a aluminiului, ca material de înlocuire a cuprului, în industria electrotehnică şi în exploatările electroenergetice din ţara noastră, constitue un obiectiv general de primă importanţă, în spre care trebue să se îndrepte atenţia tehnicienilor, inginerilor şi cercetătorilor. Orice rezultat care lămureşte comportarea şi întrebuinţarea acestui material în construcţia, montajul şi exploatarea fabricatelor şi instalaţiilor electrice este binevenit. Cu atât mai indicat este de a adăuga la rezultatele obţinute până în prezent prin numeroase lucrări teoretice, experimentale şi empirice, noi cunoştinţe asupra comportării aluminiului.

Lucrarea de faţă se referă la studiul încălzirii conductorilor de aluminiu la scurtcircuite şi are ca scop de a oferi proiectanţilor de maşini, reţele şi instalaţii electrice jaloane precise pentru dimensionarea justă a acestor conductori în vederea evitării scăderii rezistenţei mecanice provenite din solicitările termice la scurtcircuite.

Desigur că există şi se aplică în prezent norme şi indicaţii pentru dimensionarea conductorilor de aluminiu la stabilitate termică. Totuşi, din examinarea mai atentă a literaturii tehnice de specialitate reiese că nu se cunoaşte încă suficient de precis comportarea acestui material conductor la şocuri mari de curent şi că dimensionarea se face numai cu aproximaţie, păstrându-se o acoperire suficientă. Este însă foarte util pentru proiectant, constructor şi exploatator să cunoască cât mai exact felul cum răspunde materialul la orice solicitare ce poate interveni în exploatare. De multe ori, alegerea între o secţiune normalizată şi cea imediat următoare va fi uşurată dacă proiectantul va cunoaşte precis care este limita până la care poate şi trebue să meargă pentru a păstra pe de o parte calităţile materialului şi a-l utiliza pe de altă parte cât mai mult. Cele două principii antagoniste de bază în orice construcţie tehnică, anume securitatea şi economia, îşi găsesc aici o aplicare caracteristică. Economia maximă se realizează tocmai împingând solicitările admisibile cât mai aproape de limita de rezistenţă permanentă a materialului.

Studiul prezent se bazează pe cercetări experimentale efectuate în laborator. Cu toate că teoria analitică a căldurii permite urmărirea prin calcul a fenomenelor de încălzire, aceste fenomene sunt totuşi în realitate mult mai complexe decât le

formulează şi schematizează calculele teoretice. Numai măsurători pe concret permit o analiză obiectivă şi formularea de concluzii asupra unor fenomene atât de complexe. Rezultatele experimentale servesc la rândul lor la stabilirea justă a premiselor de calcul.

Este de observat că fără a fi programate ca atare, încercările experimentale s'au efectuat în condiţii foarte apropiate de acele ce apar la scurtcircuite.

Inafară de materialul documentar şi experimental care a servit ca bază pentru acest studiu, s'a dispus şi de unele rezultate fizico-tehnice inedite, mai ales asupra variaţiei parametrilor de material ai aluminiului la înalte temperaturi, ceea ce s'a constatat a fi de mare utilitate pentru cercetări.

Cu toate aceste avantaje, care păreau a asigura deducerea uşoară a unor rezultate şi concluzii utile, în cursul cercetărilor s'a constatat, că, din cauza complexităţii fenomenelor şi a condiţiilor particulare în care s'au făcut experienţele, rezultatele s'au obţinut numai după o analiză critică amănunţită, iar generalitatea concluziilor a rămas restrânsă la anumite domenii.

Cercetarea şi analiza permit însă a se formula probleme şi teme noi pentru cercetări teoretice şi experimentale viitoare astfel încât această problemă se poate urmări mai departe.

2. Explicitarea temei

Având în vedere că, după o perioadă de regim dată de curenţi normali de exploatare, în cazul unui scurtcircuit curenţii cresc foarte mult, solicitările termice ale materialului pot să întreacă limitele care îi permit conservarea caracteristicilor de rezistenţă mecanică. Ceea ce diferă în aceste faze de supraîncălzire faţă de situaţiile de regim sunt: temperaturile mult mai ridicate, care atrag după sine o variaţie a parametrilor de materiale, cedarea de căldură care are loc după alte legi decât în stare staţionară şi oxidarea superficială mai violentă, în timpul scurtei durate a acestor fenomene.

Cercetările cunoscute până în prezent consideră parametrii de material constanţi şi neglijează atât cedarea de căldură, cât şi oxidarea.

Dispunându-se de înregistrări oscilografice a intensităţii şi căderii de tensiune în firele de aluminiu, în cursul unor suprasarcini puternice de scurtă durată, de felul celor ce au loc în cazul unor scurtcircuite, cât şi de curbe exacte de variaţie a parametrilor de material până la punctul de topire, se propune a se stabili:

— temperaturile maxime reale la care ajunge conductorul;

— influenţa cedării de căldură asupra încălzirii la suprasarcini de scurtcircuit în funcţie de durata solicitării;

— influenţa oxidării suprafeţei conductorului la încălziri peste 100° C, în funcţie de durata încălzirii şi de intensitate;

— eventual alte relaţii care ar putea să rezulte din cercetările experimentale în condiţiile date.

Rezultatele urmează a fi prezentate sub o formă sub care ele să fie utilizabile direct de către proiectanţi pentru dimensionarea justă şi precisă a conductorilor.

B. PROBLEMA FIZICĂ

3. Fenomenologia încălzirii conductorilor la scurtcircuite

Cunoaşterea cât mai exactă a fenomenului în toată complexitatea lui este prima şi cea mai importantă condiţie pentru o cercetare fizico-tehnică. De aceea, în cele ce urmează se vor analiza minuţios fenomenele care apar la încălzirea conductorilor în regim permanent şi la suprasarcini de scurtă durată, luându-se în considerare

cât mai multe din fenomenele însoțitoare, spre a putea alege pe cele mai importante, care urmează a fi supuse analizei matematice.

a) Drept conductori se consideră, în general, orice cale de curent în domeniul electrotehnicii. După scopul mașinii, aparatului sau instalației în are se află, conductorii se pot găsi în condiții foarte diferite din punctul de vedere al încălzirii.

b) Principala sursă de încălzire care intervine este energia termică desvoltată de curentul electric în conductor. Alte surse pot să fie radiația solară directă pentru conductori de linii și stații aeriene sau surse adiacente de căldură, cum este fierul în mașinile electrice, încălzit din cauza pierderilor histeresis. Contactele electrice sau conductorii de secțiune mai redusă pot să devină surse de căldură, comunicată prin conductibilitate și radiație conductorilor adiacenți.

In sfârșit, temperatura mediului ambiant poate să influențeze încălzirea și supraîncălzirea conductorilor.

c) Comportarea la încălzire depinde, în general, de proprietățile fizice ale conductorului, în speță de capacitatea sa calorică. Această capacitate nu este constantă, ci ea variază la rândul ei cu temperatura. Dar nu numai capacitatea calorică, ci aproape toate proprietățile de material își schimbă valoarea când temperatura conductorului crește [1].

Rezistența electrică crește mult cu temperatura și poate influența prin aceasta efectul termic al curentului. Modificarea rezistenței electrice în circuit poate să aibă o influență asupra valorii curentului, chiar dacă tensiunea în circuit rămâne constantă. Dar rezistența electrică se modifică nu numai din cauza variației rezistivității materialului, ci și din cauza unor modificări structurale. Dintre acestea amintim oxidarea suprafeței, care transformă o pătură superficială de materia conducător într'un oxid semiconducător sau izolant și modificarea cristalină a metalelor la temperaturi peste 150°C, care face să varieze comportarea mecanică, termică și electrică. Dintre toate aceste modificări scăderea rezistenței mecanice la supraîncălziri trebue să ne preocupe în mod deosebit.

d) Răcirea conductorilor încălziți este un fenomen complex [2]. Diferențele de temperatură căutând să se echilibreze, între conductorul încălzit și mediul ambiant au loc, atât în regim permanent, cât și în regimuri de scurtă durată, schimburi de căldură. Se știe că cedarea de căldură către mediul ambiant gazos sau lichid are loc după legi complicate, a căror elucidare a întâmpinat mari greutăți. Răcirea depinde de un număr foarte mare de condiții și de proprietăți ale corpului respectiv, ca formă, dimensiuni, structură și coloarea suprafeței, de proprietățile cinematice și dinamice ale mediului ambiant, de mișcarea acestui mediu, de starea termică a corpurilor adiacente cu care se pot stabili schimburi de căldură.

Conductorii pot să fie izolați, neizolați, să facă parte din înfășurări, să aibe cele mai diferite forme, dimensiuni și să și le modifice la parcurgerea circuitului.

Inafară de aceasta, la scurtcircuite, peste o perioadă de încălzire și răcire staționară, se suprapune una tranzitorie, de scurtă durată care nici măcar teoretic nu a fost studiată până în prezent, astfel încât mișcările mediului de răcire în jurul conductorilor nu sunt staționare.

Răcirea conductorilor apare în condițiile variate de mai sus ca un fenomen atât de complex, încât urmărirea cantitativă poate să devie prohibitivă [3].

4. Forma și dimensiunile geometrice

Forma și dimensiunile geometrice ale conductorului se consideră date. De obicei este vorba de conductori cilindrici de secțiune circulară (fire) sau mai rar dreptunghiulară (bare) a căror lungime este mult mai mare decât cea mai mare dimensiune

a secţiunii, ceea ce aduce o simplificare remarcabilă în calcule. Alte forme (de exemplu contactele) complică fenomenul fizic şi tratarea matematică, din care cauză se consideră în general ca probleme speciale.

La linii aeriene de joasă tensiune se pot utiliza şi conductori din aluminiu masiv de secţiune circulară. O piedică pentru astfel de întrebuinţări este proprietatea aluminiului de a avea o rezistenţă mecanică redusă la diametre mari. Din această cauză peste secţiunea de 10 mm² se preferă în loc de conductori masivi, conductori înfuniaţi, deoarece firele componente având o secţiune mult mai mică, primesc prin trefilare o rezistenţă mecanică mult mai mare.

Este de remarcat că perimetrul acestor conductori creşte mult faţă de conductorii masivi, având secţiunea circulară echivalentă. Or, perimetrul este o măsură a suprafeţei exterioare care interesează din punctul de vedere al cedării căldurii către mediul ambiant.

O altă sursă de variaţie a suprafeţei exterioare este înfunierea. Pasul înfunierii, care este de 10—14 diametri, contribue la mărirea suprafeţei faţă de calculele de mai sus, din cauză că se măreşte lungimea de fir ce intră pe unitatea de lungime a funiei.

Desigur că în radiaţia căldurii în spre exterior intervin şi alţi parametri decât suprafaţa exterioară. De exemplu, radiaţia şi convecţia în spre exterior este stânjenită în crestăturile din apropierea liniei de atingere între firele adiacente. Totuşi este foarte util a se cunoaşte variaţia acestei suprafeţe pentru construcţiile uzuale de conductori de linie.

5. Conductibilitatea electrică

Este unul din parametri cei mai importanţi în fenomenul urmărit.

Sursa de încălzire principală este efectul termic al curentului i, variabil în timp, care generează în conductorul de o rezistenţă electrică R, o putere de

$$P = R\int_0^t i^2\,dt. \qquad \text{W} \tag{1}$$

Din cauză că atât rezistenţa cât şi dimensiunile conductorului variază cu temperatura, este indicat ca să se considere legea locală corespondentă, exprimându-se căldura produsă pe unitatea de volum prin

$$P_1 = \int_0^t j^2\rho\,dt \qquad \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} \tag{2}$$

Unde j, densitatea de curent variază în timp la fel ca şi curentul total, pe când ρ depinde în general de temperatura conductorului.

Este o particularitate interesantă că j poate fi exprimat în A/cm², iar ρ în Ω cm sau j în A/mm², şi ρ în Ω mm²/m, fără a se modifica valoarea puterii specifice. Aceasta se datoreşte identităţii

$$1\left[\frac{\text{A}^2}{\text{cm}^4}\,\Omega\ \text{cm}\right] = 1\left[\frac{\text{A}^2}{\text{mm}^4}\,\frac{\Omega\ \text{mm}^2}{\text{m}}\right] \tag{3}$$

care se verifică uşor.

Variaţiile cu temperatura a rezistenţei şi rezistivităţii electrice nu este identică.

Dacă se notează cu ψ funcția de temperatură a dilatației liniare, iar respectiv secțiunea și lungimea la 0°C, cu s_0 și l_0 atunci restivitatea la o temperatură ϑ se poate exprima prin

$$\rho_\vartheta = \frac{R_\delta \cdot s_0 \psi^2}{l_0 \psi} = R_\delta \frac{s_0}{l_0} \psi. \tag{4}$$

Ținând seama că $\rho_0 = \frac{R_0 s_r}{l_0}$, rezultă

$$\frac{\rho_\vartheta}{\rho_0} = \frac{R_\vartheta}{R_0} \psi; \tag{5}$$

prin urmare, cele două funcții de temperatură sunt în raportul variației cu temperatura a dilatației liniare [4].

Din măsurători executate de autor în cadrul unei alte lucrări s'a stabilit cu o mare precizie variația rezistenței cu temperatura la conductorii normali din aluminiu electrolic.

Conductorul a fost adus, prin încălzire indirectă într'un cuptor electric, la diferite temperaturi staționare, până la punctul de topire. Oxidarea superficială inițială normală s'a păstrat, în schimb, în cuptor conductorul se afla într'o atmosferă neutră (azot purificat), ceea ce a împiedecat progresarea oxidației. Valori reproductibile s'au obținut numai după o recoacere a materialului la temperaturi de cel puțin 300°C [4].

Din aceste experiențe au rezultat valorile înscrise în coloana a doua din tabloul Nr. 1 pentru raportul dintre rezistența electrică la o temperatură dată și rezistența la 0°C. Valori intermediare se pot citi pe curba din figura 1.

TABLOUL Nr. 1

Variația rezistenței și rezistivității electrice cu temperatura la aluminiu

Temperatura °C	Raportul rezistențelor R_ϑ/R_0	Raportul rezistivităților ρ_ϑ/ρ_0
0	1	1
100	1,404	1,4068
200	1,808	1,8168
300	2,238	2,2256
400	2, 92	2,7205
500	3,187	3,2312
600	3,098	3,7498

Această variație se poate exprima analitic, până aproape de punctul de topire prin formula

$$\frac{R_\vartheta}{R_0} = 1 + 0{,}385 \cdot 10^{-2}\, \vartheta + 1{,}05 \cdot 10^{-6}\, \vartheta. \tag{6}$$

Utilizând relaţia (5), s'au dedus valorile corespunzătoare pentru variaţia relativă a rezistivităţii cu temperatura care se găsesc în coloana a 3-a din tabloul Nr. 1.

Valoarea absolută a conductivităţii conductorilor electrici se poate lua egală cu 35 Siemens m/mm² la 20°C.

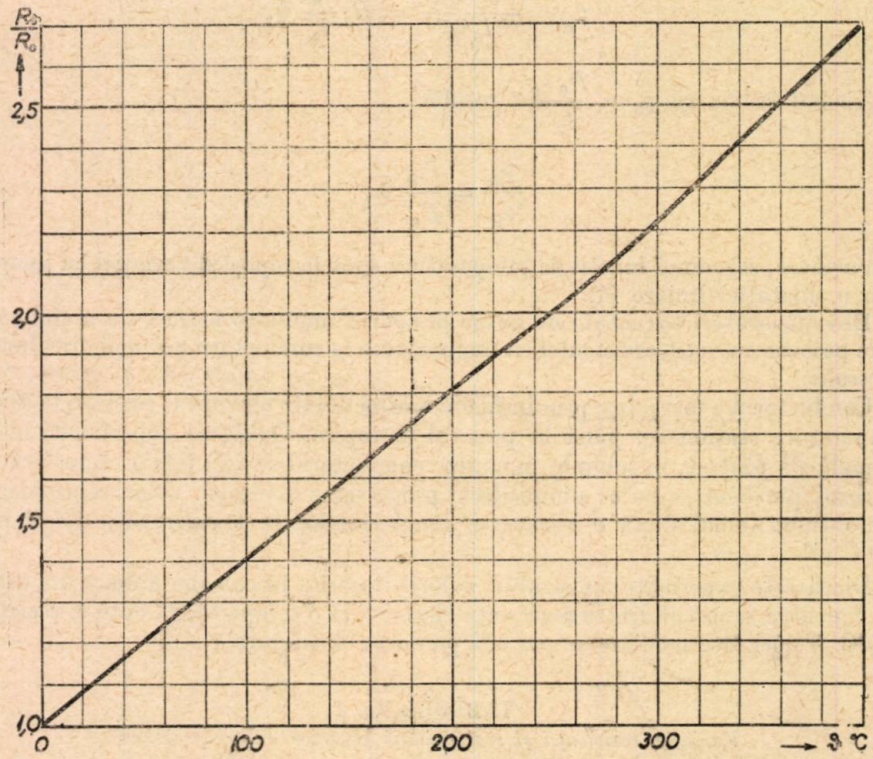

Fig. 1. — Variaţia rezistenţei electrice cu temperatura la aluminiul electrolitic.

Din influenţele care se pot exercita asupra rezistivităţii şi variaţiei ei cu temperatura, cea mai evidentă este cea a impurităţilor şi a trefilării. Ca şi la cupru, adausuri minime de alte metale în aliaj scad considerabil conductibilitatea aluminiului pur. De exemplu, 3% zinc scade conductivitatea dela 36 la 25 Siemens m/mm². Din punct de vedere metalurgic, separarea de siliciu este problema cea mai dificilă şi importantă, deoarece producerea de cristale Al-Si scade mult conductivitatea. Prin recoacere între 250 şi 350°, se poate elimina siliciul liber [5].

In electrotehnică, drept conductori se prelucrează numai aluminiul electrolitic cu o puritate de cel puţin 99,5% (şi mai puţin de 0,2%). S'a constatat, fără îndoială, că linii de aluminiu de o puritate de 95% au prezentat foarte dese deranjamente în exploatare din cauza coroziunii şi a ruperii conductorilor [1].

Concomitent cu mărirea rezistivităţii, apare o scădere a coeficientului linear de temperatură, care este maxim la metalul pur. Această influenţă este procentual mai mică decât mărirea rezistivităţii şi se poate neglija pentru diferenţe de temperaturi de 100—150°C.

Un fapt cu totul remarcabil este că prelucrarea la rece, în speţă trefilarea, provoacă prin orientarea structurii cristaline efecte similare cu cele provocate de

impurități, adică mărirea rezistivității și scăderea coeficientului linear de temperatură.

Bineînțeles că, prin recoacere corespunzătoare, efectul trefilării se poate anula. Conductibilitatea materialului și coeficientul de temperatură cresc.

Atingerea temperaturii de 250°C provoacă deci modificări structurale în conductorii trefilați ai liniilor electrice. Din punctul de vedere al variației conductibilității, trebue să distingem două posibilități. Sau temperatura nu întrece 200°C și atunci conductorul se consideră dur, ca după trefilare, având o rezistivitate și un coeficient de temperatură corespunzător, sau în cursul încălzirii se întrece temperatura de 200°C și atunci materialul devine moale și conductibilitatea trece pe o altă curbă. Valorile introduse în tabloul Nr. 1, extinzându-se până aproape de punctul de topire, nu puteau să se refere decât la fire tratate termic, spre a elimina influența trefilării. La încălziri până la 200°C se poate totuși calcula cu valorile din tabloul Nr. 1, plecând bineînțeles dela valori absolute corespunzătoare (adică mai mari) ale rezistivității.

Dacă se încălzește însă un conductor din fire trefilate la temperaturi de peste 300°C, din cauza recristalizării, rezistivitatea trece pe o altă serie de valori, mai joase decât cele ale firelor trefilate la rece. De acest fapt se poate ține seama cu o suficientă aproximație la utilizarea valorilor din tabloul Nr. 1, în sensul că se scade în mod corespunzător valoarea absolută a rezistenței de referință R_0. Aceasta se poate face în mod convenabil desenând într'o diagramă două curbe de variație a rezistenței, una calculată cu rezistența R_0 a conductorului trefilat și a doua cu cea a conductorului recopt. Atunci fenomenul variației rezistenței se urmărește aproximativ just, dacă se face o trecere continuă de pe prima pe a doua curbă între 250 și 350°C.

Această examinare minuțioasă este de mare folos pentru cercetarea care urmează, deoarece în experiențele care se vor expune s'au utilizat conductori din aluminiu trefilați la rece, care s'au încălzit până la topire, iar creșterea rezistenței a servit la determinarea temperaturii. Intr'adevăr, dacă se cunoaște precis și în amănunte corelația dintre rezistența electrică și temperatură, atunci conductorul poate servi ca termometru pentru temperatura sa proprie. Acest fapt este foarte important la încălziri rapide, deci în cazuri de scurtcircuit, în care nicio o altă metodă de măsură a temperaturii nu ar putea să dea rezultate atât de precise.

6. Oxidarea superficială

Oxidarea suprafeței exterioare a conductorilor de aluminiu este un fenomen de care trebue să se țină seama la urmărirea încălzirii. Aluminiul pur are proprietatea de a se acoperi în câteva secunde cu un strat superficial subțire de oxid de aluminiu, Al_2O_3, care este un izolant electric.

Din punct de vedere chimic, oxidul, foarte stabil, constitue o protecție foarte eficace pentru aluminiu pur, foarte sensibil la coroziune. De aceea, oxidarea superficială este binevenită atâta timp cât stratul rămâne subțire. Incălzirea conductorului accelerează procesul de oxidare, dar desfășurarea tinde spre o limită, în contrazicere cu conductorii de cupru, la care oxidul pătrunde progresiv în interiorul conductorului, fără a-l izola de atmosfera exterioară. La aluminiu pătura exterioară servește de ecran și împiedecă pătrunderea oxigenului în interiorul conductorului.

Influența oxidării asupra secțiunii eficace și deci a rezistenței conductorului se poate urmări prin calcul, dacă se cunoaște grosimea păturii de oxid.

Rezistenţa electrică R creşte proporţional cu scăderea secţiunii eficace la valoarea R_1

$$\frac{R_1}{R} = \frac{S}{S_1} = \frac{d^2}{d_1^2}. \tag{7}$$

Dat fiind că grosimea peliculei de oxid $g = \frac{1}{2}(d - d_1) = \frac{\Delta d}{2}$ este mică faţă de diametru, adică $g \ll d$, formula (7) se poate scrie aproximativ

$$\frac{R_1}{R} = \frac{d^2}{(d - \Delta d)^2} = \frac{1}{1 - 2\,\Delta d/d} = 1 + 4\frac{g}{d}. \tag{8}$$

Unei micşorări a diametrului de 2% îi corespunde o creştere a rezistenţei electrice de

$$\frac{R_1}{R} = \frac{1}{0{,}98^2} = \frac{1}{0{,}96} = 1{,}04,$$

deci de 4%.

In măsurători exacte trebue să se ţină seama deci de influenţa oxidării asupra rezistenţei, mai ales dacă variaţia rezistenţei serveşte la măsurarea temperaturii.

Oxidarea mai are un efect. Procesul chimic este exoterm în cazul aluminiului după relaţia

$$2\,Al + 1^1/_2\,O_2 = Al_2O_3 + 380{,}2\ \text{kcal/Mol}. \tag{9}$$

Această cantitate de căldură este însă neglijabilă faţă de energia calorică produsă de curent cu atât mai mult cu cât, după cum s'a spus, procesul este unic şi nu progresează decât în mod neglijabil.

Felul cum evoluează oxidarea în regim permanent, la temperaturi staţionare sub 75°C şi la supraîncălziri tranzitorii, în cazuri de scurtcircuite, este foarte puţin cunoscut. Chiar dacă se dă o descriere calitativă a fenomenului nu se indică influenţa cantitativă asupra rezistenţei la diferite temperaturi şi la diferite regimuri. Analiza şi lămurirea acestor relaţii prin cercetări experimentale este foarte utilă, deoarece se pot aprecia astfel cantitativ şi alte influenţe care apar concomitent cu oxidarea, ca acelea datorite schimbărilor structurale sau cedării de căldură către mediul ambiant.

7. Cedarea superficială de căldură

Conductorii încălziţi de curent, şi eventual de alte surse, cedează căldură prin suprafaţa laterală către mediul ambiant. Se ştie că problema cedării de căldură a corpurilor către medii gazoase sau lichide staţionare sau în mişcare este foarte complexă şi a făcut obiectul a numeroase cercetări experimentale şi teoretice. Orice evaluare empirică şi globală a felului cum se face cantitativ cedarea de căldură a eşuat principial, din cauza numărului mare de parametri care trebue să fie luaţi în considerare. Pasul cel mai important în analiza fenomenului s'a făcut prin scindarea lui în trei fenomene parţiale: conductibilitate, convecţie şi radiaţie calorică. S'a descoperit astfel că anumiţi parametri influenţau numai unul sau altul din aceste fenomene. O altă reducere remarcabilă de parametri, şi deci de influenţe, s'a făcut prin aplicarea teoriei similitudinii la teoria convecţiei. Urmărindu-se experimental aceste fenomene parţiale, s'a ajuns la o oarecare concordanţă între valorile măsurate şi cele date de teorie.

Formula cea mai simplă a cantității de căldură cedate se datorește lui N e w t o n și se scrie

$$Q = \alpha S (\vartheta - \vartheta_0) = \alpha S \theta, \tag{10}$$

unde,

Q — cantitatea de căldură cedată în unitatea de timp în W
α — coeficientul de cedare de căldură în W/cm²°C
S — suprafața prin care se cedează căldură în cm²
ϑ — temperatura peretelui exterior în °C
ϑ_0 — temperatura mediului ambiant în °C

Simplitatea acestei formulări atât de favorabile unui calcul analitic nu face decât să camufleze dificultățile reale ale problemei. Anume, α nu este un simplu coeficient, ci depinde de un număr mare de parametri, între altele chiar de temperaturile respective și de diferența de temperatură.

Literatura tehnică este plină de încercări zadarnice de a da acestui coeficient o justificare teoretică [6]. Dificultatea provine din următoarele considerente:

— Cedarea de căldură globală trebue de fapt descompusă în două componente, cea prin radiație și cea prin convecție, deoarece ele depind de alți parametri.

— Căldura radiată depinde esențial de starea și conformația suprafeței radiante și este independentă de forma ei.

— Căldura cedată prin convecție se datorește unui fenomen aerodinamic și depinde de forma și împrejurimile corpului, nu însă de materialul și starea suprafeței exterioare. In cele ce urmează se dau unele indicații pentru calculul căldurii radiate și cedate prin convecție, urmând ca pentru calculele mai exacte și mai detaliate să se facă apel la literatura de specialitate.

Radiația unui corp care se află în aer la o temperatură de 20°C, se poate evalua pe baza legii Ștefan-Boltzmann,

$$q_r = 5{,}75e\left[\left(\frac{\theta + 293}{1000}\right)^4 - \left(\frac{293}{1000}\right)^4\right] \quad \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}. \tag{11}$$

Factorul e din această formulă are valoarea unității pentru corpul negru. Pentru materiale conductoare, valoarea depinde de starea suprafeței, mai ales dacă este lucioasă sau mată (tabloul Nr. 2).

TABLOUL Nr. 2

Factorul relativ de radiație e a metalelor conductoare

Corpul negru	1	Cupru lucios	0,30
Oțel oxidat	0,8	Alamă oxidată	0,60
Oțel lucios	0,32	Alamă lucioasă	0,10
Cupru oxidat	0,72	Aluminiu oxidat	0,11
Cupru ușor oxidat	0,63	Aluminiu polizat	0,04

Se observă că valorile sunt aproximative și pot varia cu starea suprafeței în cursul unei supraîncălziri mai mari. In acest sens este favorabil faptul că radiația contribue mult mai puțin la cedarea căldurii decât convecția, mai ales pentru temperaturi care nu întrec 300°C.

In acest domeniu puterea a 4-a a temperaturii absolute față de cea a mediului ambiant nu intervine încă în mod eficace.

Convecția de căldură a unui corp către un mediu gazos sau lichid este un fenomen aerodinamic sau hidrodinamic complex, a cărui evaluare cantitativă întâmpină dificultăți mari [6], [7].

Intr'o primă aproximație convecția se poate formula după expresia liniară (10) față de temperatură. Atunci coeficientul de cedare a căldurii în (10) conține de fapt o contribuție a radiației și una a convecției,

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c .$$

In realitate α_c depinde de foarte mulți parametri, între altele și de temperatură. Aplicându-se teoria similitudinii, o mare parte din parametri se pot concentra în mărimi caracteristice fără dimensiune, adevărate « criterii » pentru aprecierea relațiilor în problema convecției.

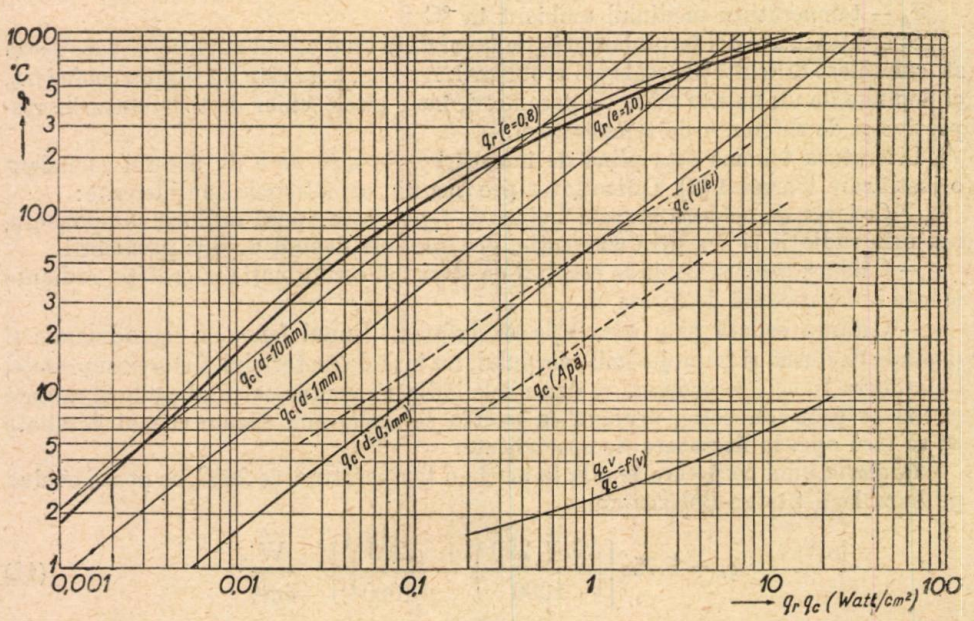

Fig. 2. — Cedarea de căldură a firelor, prin radiație și prin convecție; $f(v)$: cedarea de căldură în funcție de viteza aerului.

Criteriile lui Nusselt, Grasshoff, Reynolds și Prandtl (notate cu cele două litere inițiale) sunt legate de parametri cilindrului și ai gazului prin relațiile cunoscute.

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \qquad Gr = \frac{\beta \theta d^2 g}{\gamma^2} \qquad Re = \frac{v d}{\nu},$$

unde β este coeficientul de dilatare cubică, iar ν coeficientul de viscozitate cinematică al gazului. Pentru aer $P_r = 0{,}72$.

Incălzirea cilindrilor orizontali în gaze care se află la început în repaus este dată de relația generală,

$$Nu = C\ (Gr,\ Pr)^n,$$

iar în cazul unei mișcări forțate a aerului în jurul cilindrului, de

$$Nu = C_1\, Re^{n_1}.$$

Aceste relații conțin, constantele C și n, pentru care există în lucrările sovietice de specialitate, tablouri în funcție de celelalte mărimi [3].

Cu ajutorul lor se calculează criteriul Nu pentru temperatura medie a gazului, introducând apoi în calcule valoarea corespunzătoare a coeficientului de cedare

α_c, la care se adaugă la nevoie un supliment pentru luarea în considerare a radiației.

Pentru ingineri calculele teoretice par a fi complicate și presupun o oarecare adâncire a materiei. De aceea, este preferabil să se dea formule sau diagrame practice, din care să rezulte imediat valoarea căldurii cedate prin convecție [8].

Pe baza rezultatelor teoretice și experimentale cele mai sigure s'a încercat simplificarea formulelor pentru cilindri orizontali în felul următor. Căldura disipată pe unitatea de timp și unitatea de suprafață se exprimă aproximativ prin relația

$$q_c = k \frac{\vartheta^{5/4}}{d^{1/4}}. \tag{12}$$

Exponentul 5/4 este confirmat de experiențe; în schimb exponentul diametrului nu. Pentru diametre mari influența diametrului dispare, iar pentru diametre mici q_c variază invers proporțional cu d. Pe baza acestor constatări s'au evaluat contribuțiile de radiație și convecție a suprafețelor plane și cilindrilor orizontali și s'au reprezentat grafic în diagrama din figura 2.

8. Capacitatea de căldură

Incălzirea corpurilor nu depinde numai de energia calorică ce se furnizează, ci și de proprietatea lor de a-și ridica temperatura mai mult sau mai puțin în funcție de această energie. Capacitatea termică este factorul de proporționalitate în raportul dintre energia calorică și temperatură, după legea,

$$Q = c\gamma\theta, \tag{13}$$

unde

c — căldura specifică în J/g °C,
γ — densitatea g/cm³
θ — supratemperatura °C.

Această lege simplă, care servește, după cum se știe, chiar la definirea și măsurarea temperaturii, nu este pe deplin satisfăcută dacă temperaturile cresc peste 200—300°C.

Valori medii absolute ale densității și căldurii specifice la temperaturi de 20°C, pentru metalele conductoare și combinațiile lor obișnuite în construcția rețelelor electrice, se pot lua din tabloul Nr. 3.

TABLOUL Nr. 3

Valori ale capacității termice a metalelor conductoare

Material	γ g/cm³	c J/g°C	γc J/cm³ °C
Cupru	8,90	0,400	3,66
Aluminiu	2,70	0,962	2,60
Aldrey	2,70	0,962	2,60
Oțel-Aluminiu 1:6	3,45	0,825	2,85
Oțel-Aluminiu 1:4	3,70	0,762	2,82
Oțel-Aluminiu 1:3	4,00	0,740	2,96
Oțel	7,85	0,327	2,66

Din ultima coloană a tabloului Nr. 3 rezultă că aluminiul și aliajele sau combinațiile sub forma cărora el apare în construcția conductorilor electrici au o capacitate calorică aproape egală cu cea a oțelului, iar valoarea superioară la cupru se datorește numai densității mai mult decât de 3 ori mai mare a acestui metal.

Valorile pentru funii oţel-aluminiu de diferite compoziţii s'au calculat din formulele generale

$$\gamma = \frac{\gamma_0 + n\gamma_A}{1+n} \qquad c = \frac{c_0 + mc_A}{1+m}, \tag{14}$$

unde indicii *0* şi *A* se referă la Oţel şi Aluminiu iar *n* reprezintă raportul secţiunilor Al:OL şi *m* raportul greutăţilor Al:OL.

a) Densitatea nu se mai poate considera exact aceeaşi ca la temperaturi normale, din cauza dilataţiei termice. Pentru aluminiu funcţia de temperatură a dilataţiei liniară este

$$\psi(\vartheta) = 1 + 1{,}0.10^{-2}\,\vartheta + 0{,}4.10^{-4}\,\vartheta^2 \tag{15}$$

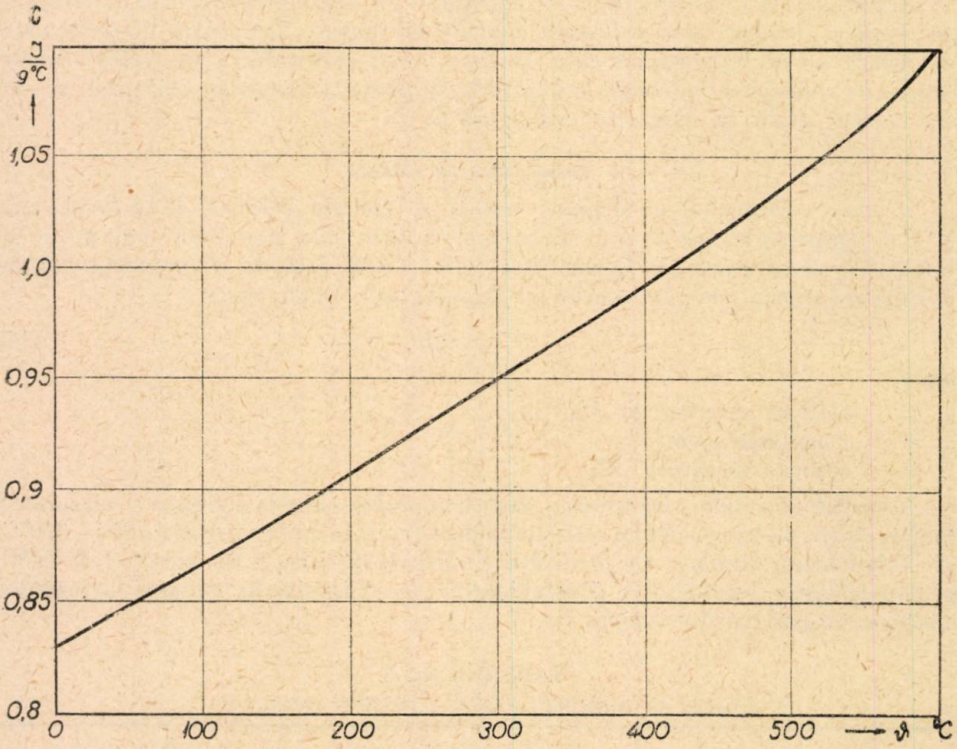

Fig. 3. — Variaţia căldurii specifice a aluminiului cu temperatura.

Dilataţia cubică creşte de trei ori mai repede cu temperatura decât cea liniară, în virtutea legilor calculului cu mărimi foarte mici. Influenţa ei devine astfel de ordinea de mărime a influenţei oxidaţiei, astfel încât ea trebue să fie luată în considerare la cercetări mai exacte.

b) Căldura specifică depinde de însăşi temperatura. Până acum 25 de ani a perisistat o oarecare confuzie în ceea ce priveşte variaţia cu temperatura căldurii specifice a aluminiului, din cauza valorilor cu totul discontinue publicate de Le Verrier, în anul 1892. Măsurători ulterioare au ridicat justificate bănueli că aceste măsurători, făcute cu metoda calorimetrică şi fără specificarea detaliilor, sunt eronate.

In anul 1931 autorul utilizând o nouă metodă electrică de măsură a efectuat măsurători de o mare precizie pentru stabilirea valorilor exacte ale căldurii specifice a aluminiului și cuprului până la punctul de topire [9].

Din aceste măsurători rezultă variația cu temperatura a căldurii specifice a aluminiului electrolitic, variație reprezentată în figura 3. Funcția de temperatură a căldurii specifice a aluminiului este dată cu o mare precizie de expresia cuadratică

$$\frac{c}{c_\vartheta} = 1 + 3{,}801.10^{-4}\,\vartheta + 5{,}0.10^{-8}\,\vartheta^2 . \qquad (16)$$

Măsurători ulterioare au confirmat justețea valorilor obținute experimental. In orice caz, astăzi se admite în mod unanim [1] că în zona temperaturilor înalte, căldura specifică a curpului și aluminiului este continuă. Discontinuități s'au observat numai la căldura specifică a fierului în apropierea punctului Curie.

Influența variației căldurii specifice nu se mai poate neglija astăzi în cercetări exacte, cu toate că ea este de aproximativ trei ori mai mică decât aceea a variației rezitenței.

9. Rezistența mecanică

Valoarea rezistenței mecanice medii a firelor trefilate din aluminiu electrolitic este de numai 17—18 kg/mm² față de 40—45 kg/mm² la cupru. Rezistența mecanică variază la aluminiu în limite largi cu secțiunea la care a fost trefilat [10], ea crescând la secțiuni mai mici. Valoarea de 17 kg/mm² se realizează numai la fire de 4 mm ⌀, pe când la fire de 10 mm diametru rezistența scade la 9,2 kg/mm². Astfel, utilizarea firelor de aluminiu pur de o secțiune mai mare devine prohibitivă din cauza săgeților prea mari și a distanței prea mici între stâlpi. La conductivitate electrică egală, firul de cupru suportă la tracțiune un efort dublu față de firul de aluminiu. Or, prescripțiile pentru linii aeriene prevăd limite tocmai pentru tracțiunea minimă la care trebue să reziste firele liniilor aeriene [11]. Deoarece pentru a îndeplini condițiile prescripțiilor ar trebui să se aleagă fire de aluminiu pur de cel puțin 18 mm² secțiune, cu o rezistență mecanică corespunzător scăzută, s'a renunțat de mult la întrebuințarea firelor masive de aluminiu, întrebuințându-se aproape exclusiv funii, ale căror fire mult mai subțiri asigură o rezistență mecanică superioară; s'a încercat de asemenea de mult a se renunța la conductivitatea superioară a aluminiului în favoarea unei rezistențe mecanice superioare, în cazul când acesta s'ar alia sau combina cu alte metale.

In acest sens, aliajul cel mai reușit al aluminiului este denumit aldrey (98,5% Al cu adausuri de Si și Mg). Firele de aldrey au o conductibilitate de 54% față de cele de cupru, având însă în schimb o rezistență mecanică de 28 kg/mm², ceea ce împreună cu greutatea mai redusă îl face comparabil cu cuprul din punctul de vedere al construcției de linii [12].

Prin încălzire la temperaturi de 250—300°C, materialul conductor, care prin trefilare la rece a atins o înaltă rezistență mecanică, trece printr'o completă restructurare cristalină în stare moale sau recoaptă, în care rezistența mecanică nu reprezintă decât o fracțiune a celei din starea dură. Din punct de vedere cantitativ pierderea este în acest caz de 40% pentru cupru, 50% pentru aluminiu, 65% pentru aldrey, deci rezistența scade la 60% pentru cupru, 50% pentru aluminiu, 35% pentru aldrey din valoarea medie în starea inițială normală [13].

Experiențe efectuate au confirmat bănuiala că durata încălzirii, adică durata scurtcircuitului, nu are nicio influență asupra restructurării cristaline, la funii

normale. S'a constatat anume că, dată fiind capacitatea mare de căldură a conductorilor, răcirea lor se produce într'un timp atât de lung, încât procesul de recristalizare este complet. Numai la fire subţiri s'a constatat o influenţă a duratei încălzirii. Astfel, pierderea de rezistenţă mecanică depinde, în general, numai de valoarea temperaturii maxime pe care o poate atinge conductorul în cazuri de scurtcircuite. Din această cauză, cunoaşterea cât mai exactă a temperaturii maxime în funcţie de efectul termic al curentului de scurtcircuit şi de fenomenele conexe ce apar este de cea mai mare importanţă [14].

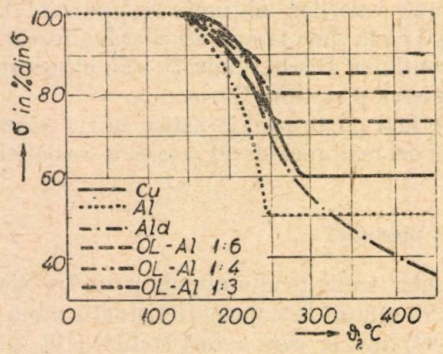

Fig. 4 — Scăderea rezistenţei mecanice cu temperatura la metale conductoare.

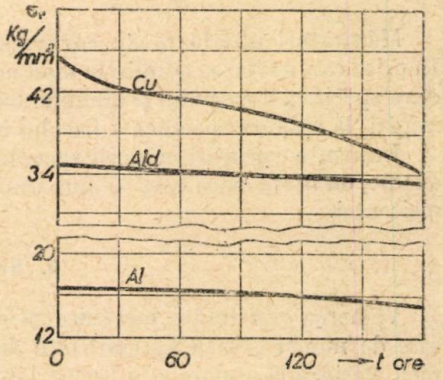

Fig. 5. — Influenţa încălzirii de regim la 77°C asupra rezistenţei mecanice a conductorilor.

In mod normal, la o depăşire a temperaturii maxime, la care se produce o totală înmuiere a materialului, pierderea de rezistenţă rămâne staţionară. Astfel, temperaturile corespunzând unei complete recristalizări sunt valori minime. In schimb temperaturile care se indică pentru o pierdere de 0% a rezistenţei, reprezintă valori maxime, până la care nu este de aşteptat nicio scădere a rezistenţei mecanice.

TABLOUL Nr. 4

Scăderea rezistenţei mecanice a conductorilor electrici în funcţie de încălzirea staţionară (faţă de 20°C)

Materiale	Diametru mm	Rezistenţă mecanică kg/mm²	Scăderea rezistenţei mecanice în % la temperatura de °C			
			50	75	100	150
Aluminiu (99,5%)	2,4	16,4	2	5	9	32
Aldrey	2,4	32,9	2	9	18	62
Cupru	2,0	45,9	4	25	37	44

La funii oţel-aluminiu se presupune că numai firele de aluminiu pierd din rezistenţa mecanică, avându-se în vedere comportarea refractară cunoscută a oţelului. Din această cauză la funii de

Oţel-Aluminiu 1:6 pierderea totală este de 24%
Oţel-Aluminiu 1:4 » » » 20%
Oţel-aluminiu 1:3 » » 15%

presupunând că, aceste funii sunt construite din oţel cu o tensiune de încercare de 120 kg/mm² şi din aluminiu de 18 kg/mm².

TABLOUL Nr. 5

Variația parametrilor aluminiului electrolitic

Proprietatea	Unitatea	Temperatura											
		20	50	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250
		Trefilat dur							Recopt două ore la 300°C în ulei				
Tensiunea admisibilă	kg/mm²	14,7	14,0	13,2	10,7	8,3	6,0	2,87	9,9	7,78	6,71	5,04	3,8
Tensiunea de rupere	kg/mm²	39	44,4	30,9	15,4	15,8	14,8	—	33,7	27,4	31,1	17,0	16,6
Alungirea	%	14	11,5	9,5	10,7	12,2	14,3	46 *)	33,1	32,8	34,7	35,1	33,3
Contractare relativă în secțiunea de rupere	%	77,5	79,1	74,3	76,1	81,7	86,4	95,7	84,4	78,2	83,0	82,3	83,7
Modul de elasticitate static	kg/mm²	7200	6550	6495	5475	5500	4730	4770	6600	6580	5640	5660	5890
Modul de elasticitate dinamic ..	kg/mm²	6590	6000	6290	6100	5170	3910	—	5370	4140	—	4200	4050
Tensiunea la o alungire reziduală de 0,01%	kg/mm²	11,6	9,9	9,1	3,2	1,3	0,96	0,66	2,74	2,3	2,12	1,43	0,95
Tensiunea la o alungire reziduală de 0,05%	kg/mm²	12,5	11,8	10,5	6,2	3,3	2,9	1,3	3,59	3,22	3,18	2,4	1,77
Tensiunea la o alungire reziduală de 0,2% (limită de curgere) ..	kg/mm²	13,1	12,7	11,9	8,6	6,4	4,0	1,7	4,4	4,1	4,4*)	3,03	2,26
Rezistența la vibrații de durată .	kg/mm²	7,6	6,7	6,7	4,1	2,9	1,65	—	2,7	2,5	—	1,95	1,55

*) Cifră greșită în original și corectată de autor.

In figura 4 s'a reprezentat scăderea rezistenţei mecanice în procente din valoarea iniţială normală la funii din Cupru, Aluminiu şi Oţel-Aluminiu 1:6 şi 1:4 în funcţie de temperatura maximă. Inafară de valorile indicate mai sus, din figura 4 se pot citi valori intermediare ale scăderii procentuale a rezistenţei mecanice şi a temperaturilor maxime admisibile. Utilizarea acestei figuri este importantă, mai ales în cazurile, când se admite din capul locului o limitată pierdere a rezistenţei mecanice, de exemplu 10% . In acest caz temperatura poate atinge valori mai mari decât dacă nu s'ar admite nicio scădere a rezistenţei [13].

A. S. Zaimovschi şi V. V. Usov [1] au confirmat că recristalizarea şi pierderea rezistenţei mecanice a firelor din aluminiu trefilate la rece, începe la 160—180°C, indiferent de durata cât persistă această încălzire, după cum se vede din tabloul Nr. 4.

Scăderea procentuală este mai mică la aluminiu decât la cupru, dar valoarea absolută mult mai mică a rezistenţei la aluminiu joacă un rol important în utilizările electrotehnice.

La încălziri de durată, recristalizarea poate să intervină la temperaturi mult mai joase. Aceasta este important în legătură cu sarcina de regim admisibilă pe timp de vară sau în regiuni sudice, unde conductorii pot să se încălzească la 70—80° C.

S'a constatat că rezistenţa mecanică a aluminiului încălzit timp de 1000 de ore la 70—90°C a scăzut dela 20 la 15 kg/mm².

Cercetări mai recente (1933) făcute în Uniunea Sovietică [1] au arătat că rezistenţa mecanică continuă să scadă chiar după 270 de ore de solicitare, după cum se vede din figura 5.

Tabloul Nr. 5 conţine rezultatele unor cercetări [8] asupra variaţiei parametrilor mecanici şi de rezistenţă a unui fir de 5 mm ∅ din aluminiu electrolitic (99,5%), încălzit staţionar într'o baie de ulei. Rezistenţa la vibraţii de durată s'a încercat la o turaţie de 3000 de rotaţii pe minut, forţa fiind aplicată perpendicular pe axa de rotaţie.

V. V. Usov [15] a cercetat rezistenţa mecanică a barelor de aluminiu de 40×4 mm la supraîncălziri ajungând până la 300°C, rezultatele fiind cele consemnate în tabloul Nr. 6. Se constată că pierderea rezistenţei aluminiului începe la 50°C şi se accentuează la 150°C. In schimb alungirea nu are loc până aproape de 300°C, adică până la recristalizarea completă.

Indiferent de rezistenţa iniţială şi de densitate, la 400°C rezistenţa la rupere ajunge la 1,5 kg/mm², fapt care s'a confirmat în multe cercetări [5].

TABLOUL Nr. 6

Rezistenţa mecanică a barelor de aluminiu (40 × 4 mm) în funcţie de încălzire (durata 15 minute)

Proprietatea	Temperatura °C							
	20	50	100	150	200	250	300	350
Rezistenţa la rupere kg/mm²	14,9	14,9	14,5	14,3	13,8	13,3	11,3	8,6
Alungirea %	5,75	6,0	5,0	6,0	5,0	6,0	10	35
Duritate Brinell	42	42	40	40	39,5	38	28,5	21,5

TABLOUL Nr. 7

Comportarea firelor de 1 mm diametru din metale și aliaje încercate la încălziri prin curenți de scurtcircuit (j = 25,5 — 255 A/mm²; t = 0,08 — 6 s)

Metal	Impurități	Rezistența la rupere kg/mm²	Conductivitatea electrică Ωm/mm²
Aluminiu	Fe = 0,17 Si = 0,14	22,3	35,0
Aldrey	Fe = 0,33 Si = 0,49 Mg = 0,51	34,5	30,9
Aludur	Fe = 0,27 Si = 1,01 Mg = 0,43	35	27,9
Cupru	0,15%	42,5	56,8
Bronz	Sn = 1÷2 Mg = 0,8÷2	76,0	38,2

Problema influenței încălzirilor de scurtă durată asupra rezistenței mecanice este mai complicată din cauză că recristalizarea se face foarte repede.

Cercetări asupra acestei probleme au fost întreprinse în anul 1928 [16] de H. Schmidt, care a studiat scăderea rezistenței electrice a firelor din materiale conductoare (cupru, aluminiu, aldrey, aludur, bronz), pe care experimentală, constatând pe probele consemnate în tabloul Nr. 7 că temperaturile (măsurate din dilatarea liniară) la care rezistența mecanică începe să scadă la încălziri de cel mult 3s sunt: cupru 220—240°C, bronz 190—200°C, aluminiu 160—180°C, aludur 170—180°C, aldrey 180—200°C.

Valorile minime ale rezistenței mecanice după o încălzire bruscă, în procente din valorile inițiale au fost: cupru 57%, bronz 37%, aluminiu 44%, aludur 36%, aldrey 35%.

Din curbele scăderilor de rezistență constatate experimental s'au reprodus cele pentru aluminiu.

Se încearcă urmărirea prin calcul a fenomenului de încălzire, dar se neglijează cedarea de căldură și variația parametrilor cu temperatura, găsindu-se o concordanță care se consideră mulțumitoare.

Asupra acestor experiențe se va reveni mai jos.

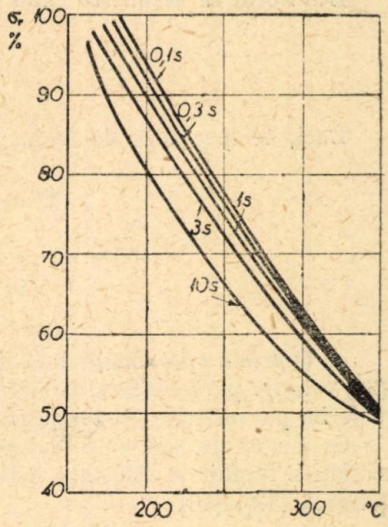

Fig. 6 — Rezistența la rupere a conductorilor de aluminiu la încălziri scurte prin supraintensități.

C. PROBLEMA MATEMATICĂ

10. Încălzirea staționară

Cunoașterea cantitativă a fenomenului încălzirii staționare este necesară pentru studiul încălzirii la scurtcircuit, deoarece conductorul se găsește permanent la tem-

ratura staţionară, care rezultă din echilibrul termic de regim, dela care începe supraîncălzirea în caz de suprasarcini.

Spre a putea cuprinde prin calcul fenomenul, acesta trebue să fie schematizat. Detalii sau fenomene anexe se vor lua în considerare prin aproximaţii succesive [17].

Se consideră un conductor cilindric circular din aluminiu, având diametrul d, secţiunea s şi perimetrul p, întins orizontal în aer (aproximaţia unei bare de înaltă tensiune sau a unui conductor de linie. Temperatura se consideră constantă în secţiune. In calcul se introduce numai supratemperatura θ, peste temperatura aerului.

Parametri de material se consideră deocamdată constanţi.

Punerea în ecuaţie se face pe baza legii energiei; căldura ce se naşte în unitatea de volum şi în unitatea de timp (debitul) este la curenţi constanţi

$$W = \frac{I^2 R}{s l} = \frac{I^2}{s l} \frac{\rho l}{s} = j^2 \rho \tag{17}$$

In volumul sl deci

$$Q_1 = j^2 \rho . s l. \tag{18}$$

Prin suprafaţa laterală se cedează, tot în unitatea de timp, după legea lui Newton, căldura

$$Q_2 = \alpha \; p \; l \, \theta. \tag{19}$$

Echilibrul se stabileşte când $Q_1 = Q_2$ adică

$$j^2 \rho = \alpha \frac{p}{s} \; \theta . \tag{20}$$

Deci, temperatura de regim este

$$\Theta = \frac{j^2 \rho \, s}{\alpha \, p} = j^2 \rho \frac{d}{4 \alpha} = \tag{21}$$

$$= \frac{I^2 R}{\alpha \, p \, l} = \frac{I^2 R}{\pi d \, \alpha \, l} . \tag{22}$$

a) O primă aproximaţie faţă de realitate se poate realiza considerând în ecuaţia (21) valorile parametrilor de material la temperatura θ, care reiese din calculul cu valorile parametrilor la temperatura normală (20°C).

Se ştie că de fapt ar trebui să separăm în α componenta datorită convecţiei şi radiaţiei. Neglijând influenţa radiaţiei până la 300°C şi introducând convecţia după formula [12], [16]

$$\alpha = k_1 \sqrt{\frac{\vartheta}{d}} \tag{23}$$

unde k_1 area valoarea numerică de $1{,}25 . 10^{-3}$; dacă d se exprimă în mm şi α_c în W/cm² °C, rezultă în locul relaţiei (21)

$$\Theta = j^2 \rho \frac{d^{5/4}}{k_1 \, \theta^{1/4}} \tag{24}$$

deci

$$\Theta = \left(\frac{j^2 \rho}{k_1}\right)^{4/5} \cdot d \,. \tag{25}$$

Această expresie se calculează ușor cu rigla.

b) A doua aproximație se obține dacă se consideră o funcție liniară de variație cu temperatura a raportului $\frac{\rho}{\alpha}$ în relația (21), ceea ce dă

$$\theta_1 = \left(j^2 \frac{\rho d}{4\alpha}\right)_0 (1 - \delta\theta_1) = \Theta\,(1 - \delta\,\theta_1), \tag{26}$$

din care rezultă o temperatură de regim de

$$\Theta_1 = \frac{\Theta}{1 - \delta\,\Theta} \,. \tag{27}$$

Aici Θ se introduce din expresia (21).

c) Aproximații mai bune se obțin înlocuind parametrii de material sau combinațiile parametrilor de material care intervin în (21), cu expresii analitice potrivite, care oglindesc variația lor cu temperatura sau, în sfârșit, introducând în relația (21) valorile experiementale ale parametrilor.

11. Încălzirea staționară la soare

Influența radiației solare poate modifica destul de sensibil temperatura staționară, mai ales că în același timp face să varieze și temperatura mediului ambiant. S'a constatat că vara conductorii liniilor aeriene pot să ajungă la 40°C fără nicio sarcină.

In calculul radiației solare se pleacă dela o intensitate medie a radiației ξ, exprimată în W/cm², care se obține din măsurători pe o perioadă lungă de timp.

Pentru zone temperate valoarea ξ variază între 90 și 100 mW/cm².

Dacă se introduce separat contribuția radiației și a convecției, rezultă bilanțul

$$I^2 r + \xi\, e_s\, d = 5{,}75\, e_p \left[\left(\frac{\vartheta + 273}{1000}\right)^4 - \left(\frac{293}{1000}\right)^4\right] + Q_c \quad \frac{\text{W}}{\text{cm}} \tag{28}$$

în care

r este rezistența conductorului pe cm lungime, e_s coeficientul de absorbție a razelor solare (0,6 pentru suprafețe lucioase și 1,0 pentru suprafețe mate), Q_c — debitul de căldură pierdut prin convecție în W/cm lungime de fir.

Debitul de căldură se poate stabili din diagrama din figura 2. Totuși aceste valori sunt valabile exact numai pentru fire masive.

Pierderile prin convecție naturală și forțată a conductorilor aerieni se pot stabili prin experiențe, atât timp cât contribuția radiației este mică și se poate aprecia prin calcul. Contribuția radiației fără convecție se află introducând conductorii în vid și măsurând pierderile de energie.

Experiențele recente au arătat că există diferențe între cedarea prin convecție a conductorilor masivi și cablați, numărul firelor la cei cablați nu are însă nicio influență, atât timp cât este cuprins între 3 și 37.

Valorile experimentale sunt redate de următoarele formule empirice pentru valoarea Q_c din ecuația (28).

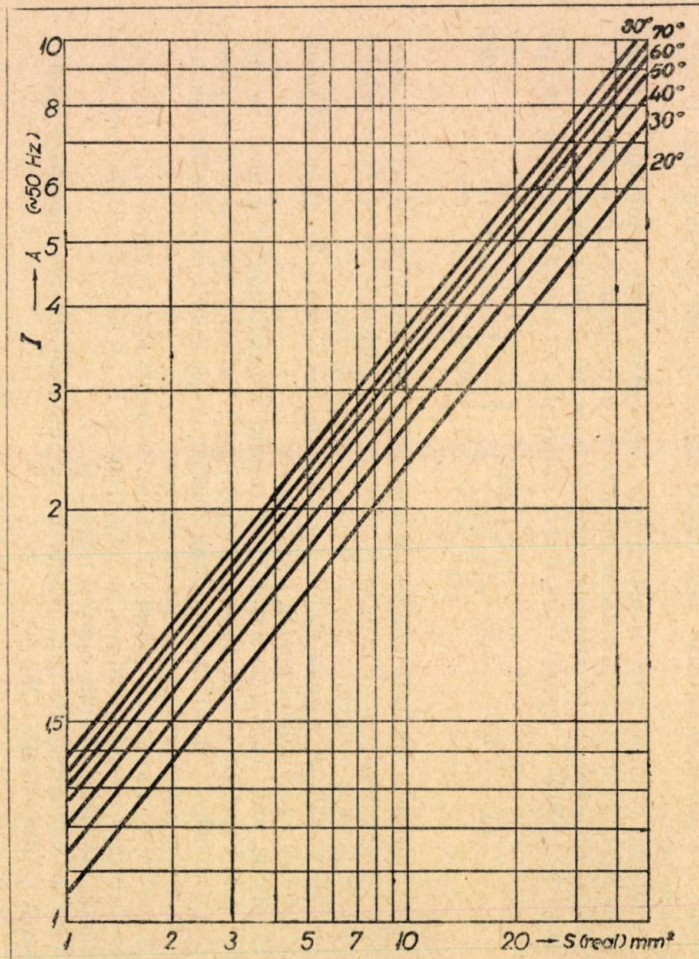

Fig. 7. — Sarcina de regim a funiilor de aluminiu pentru diferite supratemperaturi.

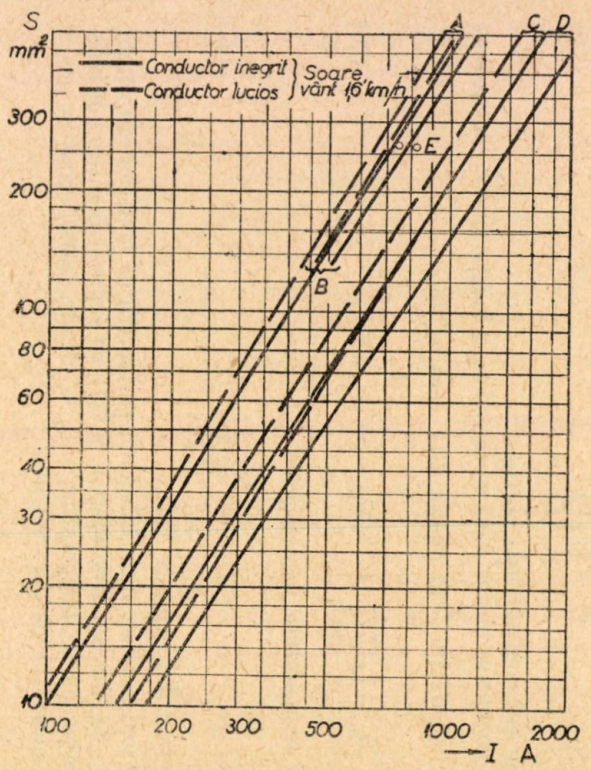

Fig. 8. — Sarcina admisibilă a conductorilor aerieni la soare şi în vânt de 1,5 km/h.

A: Cu dur şi OL—Al 1:6 şi 6:7
B: OL—Al 7:30, $\theta = 75°C$
C: Br II $\theta = 115°C$
D: Br III $\theta = 150°C$

La convecție naturală:

$$Q_c = \begin{cases} 12{,}8.10^{-4}\, d^{0{,}699}\, \theta^{1{,}233} & \text{pentru conductori cablați} \\ 19{,}5.10^{-4}\, d^{0{,}561}\, \theta^{1{,}187} & \text{pentru conductori masivi.} \end{cases} \tag{29}$$

La convecție forțată (vânt normal pe conductor de 20 cm/s)

$$Q_c = \begin{cases} 13{,}8\ .10^{-4}\, (vd)^{0{,}499}\, \theta & \text{pentru conductori cablați} \\ 15{,}95.10^{-4}\, (vd)^{0{,}462}\, \theta & \text{pentru conductori masivi.} \end{cases} \tag{30}$$

Creșterea convecției în funcție de vânt este substanțială. Ea se poate deduce din figura 2.

Aceste rezultate permit ca pe baza experienței anterioare să se stabilească cu mare precizie temperaturile staționare ale conductorilor din aluminiu și alte metale conductoare.

Pentru conductori înfuniați din aluminiu pur, sarcinile de curent sunt redate în figura 7, în funcție de secțiunea reală cu supratemperatura ca parametru.

Sarcinile staționare admisibile pentru conductori din alte materiale sau combinații de materiale se pot obține prin înmulțirea valorilor ce rezultă din figura 7 cu un factor de corecție care este pentru cupru 1,25—aldrey 0,95—oțel-aluminiu 1:6 — 0,925, oțel-aluminiu 1:4 — 0,901, oțel aluminiu 1:3 — 0,865.

Pentru o temperatură maximă de 75°C și o încălzire de 35°C rezultă, cu ajutorul formulelor (29) și (30), sarcinile de regim din figura 8 în funcție de secțiunea echivalentă de cupru pentru diferite materiale și compoziții ale conductorilor.

Variind valoarea coeficientului relativ al radiației între limite ce corespund unei suprafețe lucioase și oxidate, rezultă câte două curbe pentru fiecare material.

Cu ajutorul acestor formule și date, temperatura staționară a conductorilor aerieni se poate considera pe deplin stabilită.

Mai complicat devine calculul pentru bare din stații, deoarece intervin multe influențe și fenomene conexe, dintre care amintim efectul pelicular, efectul de proximitate, radiația reciprocă, forma secțiunii, numărul de bare pe fază, influențele capetelor, etc. Aceste influențe pot fi luate în considerare prin factori de corecție. Intr'o lucrare recentă se dau valori pentru 10 factori de corecție [18]. Intensitatea de regim admisibilă pentru supratemperaturi până la 50°C se calculează din formula:

$$I^2 = K \frac{ps}{\rho} \theta, \tag{31}$$

unde $K = 0{,}695$ sau $0{,}525$ mW/cm² °C pentru bare rotunde sau plate de aluminiu.

Formula se poate aproxima prin

$$\left.\begin{aligned} I^2 &= 0{,}55\, d^3\, \theta \text{ pentru bare rotunde} \\ I^2 &= 0{,}40\, bh^2\, \theta \text{ pentru bare plate } b \times h \end{aligned}\right| \tag{32}$$

Pentru astfel de probleme există abace, care permit obținerea rapidă a rezultatelor [19].

Problema încălzirii staționare se complică și mai mult la conductori izolați sau la înfășurări, deoarece intervin medii de răcire neomogene sau stratificate, convecția aplicându-se pe suprafața exterioară în contact cu aerul sau uleiul, cele două medii de răcire clasice ale electrotehnicii [20].

Problemele complicate de curgerea căldurii în sisteme complexe cu parametri neomogeni pot fi simplificate prin introducerea noțiunii de rezistență termică. Legea

conductibilităţii devenind identică cu legea lui Ohm, schemele termice se reduc la circuite electrice echivalente. Pe baza acestei principiu nou, şi pierderea de căldură prin convecţie se poate înlocui cu un debit de căldură printr'o rezistenţă termică.

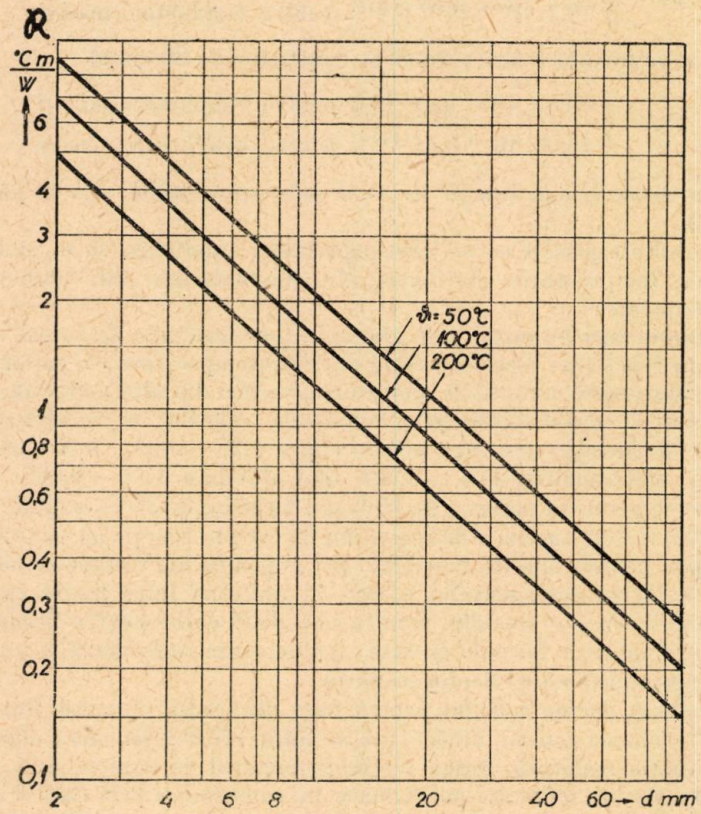

Fig. 9. — Rezistenţa termică echivalentă pentru cedarea de căldură a conductorilor orizontali în aer.

Astfel, în figura 9 s'a reprezentat rezistenţa termică între suprafaţa conductorilor orizontali de temperatură ϑ_1 şi aer de 20°C, coeficientul de radiaţie fiind 5,0 W/m² $(°K)^4$.

Notând rezistenţa termică cu $\mathfrak{R}$ (cm°C/W), căldura cedată în unitatea de timp pe suprafaţa radială este pe unitatea de lungime

$$Q_1 = \frac{\theta}{\mathfrak{R}} \quad \frac{W}{cm} \tag{33}$$

iar căldura produsă de curent

$$W = \frac{I^2 R}{l} \quad \frac{W}{cm} \tag{34}$$

deci

$$\theta = V\mathfrak{R} = \frac{I^2 \rho}{s} \mathfrak{R}°C$$

Aceste relații sunt identice cu (18) și (22), ele pretându-se totuși mai bine la rezolvarea unor probleme mai complicate din cauza reducerii la scheme electrice echivalente. Asemănarea soluției (33) cu legea lui Ohm este evidentă. Combinații caracteristice de conductori și izolatori termici se pot calcula principial și în prealabil, rezultatele fiind introduse în tabele, ceea ce ușurează aplicația la cazuri practice [20].

12. Ecuația încălzirii la scurtcircuit

La apariția unui scurtcircuit intensitatea curentului crește brusc la valori multiple față de cele normale. Se știe că intensitatea curentului de scurt circuit variază în timp, ea tinzând a se apropia după 0,2—0,5 s de o valoare staționară. Studiul încălzirei la scurtcircuit trebue să țină seama de această variație a curentului [21].

Plecând dela schematizarea fenomenului aleasă pentru calculul fenomenului staționar, căldura ce se naște din efectul termic al curentului trebue exprimată pentru un element diferențial de timp.

Termenii bilanțului energetic sunt, cu aplicarea schematizărilor anterioare

căldura produsă de curent în volumul sl

$$dQ_1 = j^2 \rho\, sl\, dt \tag{35}$$

căldura cedată prin suprafața radială exterioară

$$dQ_2 = \alpha\, pl\, \theta\, dt \tag{36}$$

căldura rămasă în elementul de volum

$$dQ_3 = \gamma\, c\, sl\, d\,\theta. \tag{37}$$

Din bilanțul energetic $dQ_1 = dQ_2 + dQ_3$ rezultă

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha}{\gamma c}\frac{p}{s}\theta 1 - j^2\frac{\rho}{\gamma c} = 0 \tag{38}$$

o ecuație diferențială ordinară de gradul I pentru supratemperatura θ.

Condiția necesară pentru stabilirea constantei de integrare, este ca la apariția scurtcircuitului, temperatura să fie cea de regim

$$\theta = \theta_0 \quad \text{pentru} \quad t = 0 \tag{39}$$

Din examinarea acestei ecuații se pot face imediat următoarele constatări:

a) Ultimul termen din stânga dă variația în timp a temperaturii când nu există cedarea radiată de căldură ($\alpha = 0$)

$$\frac{d\vartheta}{dt} = j^2\frac{\rho}{\gamma c} \tag{40}$$

sau când aceasta poate fi neglijată.

La începutul procesului de încălzire, termenul al doilea (38) este foarte mic față de ceilalți, chiar dacă $\alpha > 0$. Deci termenul al treilea stabilește panta de creștere a temperaturii la începutul procesului de supraîncălzire. Această pantă nu depinde de condițiile răcirii prin radiație și convecție. Ea este la început comună pentru orice valoare a coeficientului de cedare α și depinde numai de valoarea termenului al treilea (38) la temperatura de regim [22].

b) Coeficientul temperaturii în termenul al doilea (38) are dimensiunea 1/s și poate fi considerat inversul unei constante de timp a fenomenului, după cum se va arăta mai jos.

c) Temperatura staționară se obține din ecuația (38) prin anularea primului termen.

c) La întreruperea curentului se anulează termenul al treilea (38) şi răcirea conductorului poate fi urmărită din ecuaţia

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha}{\gamma c}\frac{p}{s}\theta = 0. \tag{41}$$

Termenul al doilea fiind eminamente pozitiv, înseamnă că termenul întâi trebue să devie negativ, deci temperatura nu poate decât să descrească în mod continuu, în concordanţă cu realitatea.

Ecuaţia (38) rămâne lineară şi se rezolvă cu uşurinţă în cazul când coeficienţii se consideră constanţi, sau numai funcţii de variabila t. Termenul al treilea depinde atât de t cât şi de θ, după funcţii care pot considera date în conformitate cu cele expuse mai sus (punctele 5, 6 şi 8). Dificultăţi mai mari apar în legătură cu formularea dependenţelor termenului al doilea al răcirii. In afară de dificultăţile enumerate mai sus (punctul 3 şi 7) mai intervine faptul că fenomenul cedării nu este staţionar — aşa cum a fost cercetat în literatura de specialitate — ci eminamente tranzitoriu, scurtcircuitul având o durată medie de 2—3 sec. După cum s'a arătat la punctul 9, pierderea rezistenţei mecanice depinde în mod esenţial de temperatura maximă, adică de procesul de încălzire, iar durata are o influenţă redusă, deoarece răcirea este mult mai lentă decât încălzirea.

Intr'adevăr, scriind ecuaţia (38) sub forma

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha}{\gamma c}\frac{p}{s}\theta = j^2\frac{\rho}{\gamma c},$$

se vede imediat că valoarea termenului al treilea influenţează esenţial asupra pantei de creştere a temperaturii şi, la durate egale, asupra temperaturii maxime.

13. Variaţia coeficienţilor ecuaţiei diferenţiale

O altă observaţie esenţială care se poate face din simpla examinare a ecuaţiei diferenţiale, este că parametrii apar în coeficienţi în anumite combinaţii. Deci pentru rezolvarea exactă a problemei încălzirii nu interesează atât influenţele pe care parametriile suferă individual, ci influenţele pe care ei le suferă în grupările în care apar în coeficienţi. Acest fapt cere o examinare mai atentă şi detaliată, spre a conduce cercetarea matematică, cât mai aproape de realităţi.

a) Coeficientul $\rho/\gamma c$ depinde numai de temperatură, după o funcţie care se poate obţine exact plecând direct dela curbele experimentale ale parametrilor individuali şi căutând o expresie analitică pentru curba rezultantă. Această curbă experimentală este reprezentată în figura 10.

Influenţa majoră o exercită funcţia de temperatură a rezistivităţii care este cea mai mare. Variaţia coeficientului este mai mică decât cea a rezistivităţii, deoarece căldura specifică creşte cu temperatura, însă mult mai puţin decât rezistivitatea. Neglijarea acestei variaţii la încălziri peste 50°C este neadmisibilă.

Autorul a arătat [23] că dacă densitatea de curent se referă la secţiunea în momentul $t = 0$, termenul al treilea al ecuaţiei diferenţiale variază cu funcţia de temperatură a expresiei $\rho/\psi c$ unde ψ este funcţia de temperatură a dilataţiei liniare.

Intr'o primă aproximaţie variaţia cu temperatura a acestei expresii se poate considera liniară. Coeficientul termenului liniar care se apropie până la punctul de topire cel mai mult de forma curbei experimentale este

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Al} &= 3{,}44.10^{-3} \quad °C^{-1} \\ \varepsilon_{Cu} &= 3{,}50.10^{-3} \quad °C^{-1}. \end{aligned} \tag{42}$$

Bineînțeles că poate fi aleasă valoarea cea mai corespunzătoare, dacă se cunosc limitele de variație a temperaturii.

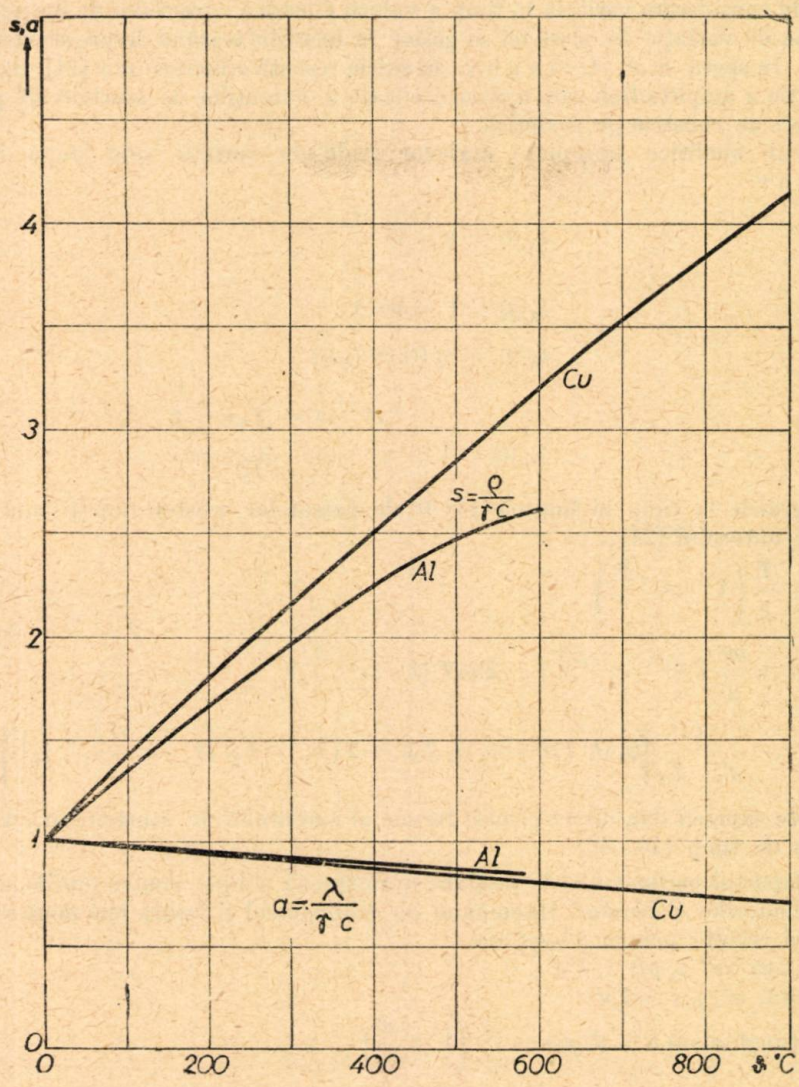

Fig. 10. — Variația parametrilor caracteristici la aluminiu și cupru cu temperatura.

Intr'o a doua aproximație se poate căuta o expresie de gradul 2. In acest caz, din calculele autorului rezultă până la topire funcțiile

$$f(\vartheta)_{Al} = 1 + 3{,}49.10^{-3}\,\vartheta - 0{,}47.10^{-6}\,\vartheta^2$$
$$f(\vartheta)_{Cu} = 1 + 3{,}85.10^{-3}\,\vartheta - 0{,}75.10^{-6}\,\vartheta^2. \qquad (43)$$

Aproximații și mai bune se obțin operând direct cu valorile experimentale din curbele din figura 10.

b) Densitatea de curent este o funcţie de timp. Neglijând pentru încălzirea conductorilor variaţia periodică a curentului alternativ cu frecvenţa reţelei, trebue să se ia în considerare variaţia în timp a valorii eficace a curentului de scurtcircuit.

Curbe de variaţie de acest fel se găsesc în lucrările tratând despre scurtcircuite în reţele. In speţă S. A. U l i a n o v, în ediţia recentă a lucrării sale [21], dă curbe de variaţie a amplitudinii sau a valorii eficace a curenţilor de scurtcircuit pentru generatori de construcţie sovietică.

Funcţii analitice apropiate curbelor reale de variaţie sunt după S. A. U l i a n o v

$$f_1(t) = e^{-\frac{t}{T}} \tag{44}$$

$$f_2(t) = 1 - me^{\frac{t}{T}} \tag{45}$$

$$f_3(t) = f_2(t) + f_4(t)$$

$$f_4(t) = 1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T}} - T_2 e^{-\frac{t}{T}}}{T_1 - T_2} \tag{46}$$

Integralele în timp în limitele t şi 0 ale patratelor acestor funcţii sunt, după calculele autorului [24]

$$\varphi_1(t) = \frac{T}{2}\left(1 - e^{-\frac{2t}{T}}\right) \tag{47}$$

$$\varphi_2(t) = t + \frac{m^2}{2} T\,(1 - e^{-\frac{2t}{T}}) - 2mT\,(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{48}$$

$$\varphi_4(t) = t - \frac{1}{T_1 - T_2}\left\{\varphi_1(t_1\, T_1) + \varphi_1(t_1\, T_2) - 2\,(T_1 + T_2)\left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_1} + \frac{t}{T_2}\right)}\right]\right\} \tag{49}$$

Aceste expresii dau direct efectul termic al curentului de scurtcircuit, care are funcţiile de timp (44—46).

c) Raportul perimetrului la secţiune are expresii simple pentru profile normale ale conductorilor şi barelor. Insemnând cu d diametrul şi latura mai mare a dreptunghiului rezultă pentru o secţiune

circulară $\pi d^2/4$, $p/s = 4/d$

pătrată, d^2, $p/s = 4/d$

dreptunghiulară $b \times d$, $p/s = \frac{2}{d}\left(1 + \frac{d}{b}\right)$

d) Mărirea $\frac{\alpha}{\gamma c}\frac{p}{s}$ depinde în stare staţionară numai de temperatură, în stări tranzitorii depinzând însă şi de viteza de desfăşurare a fenomenului într'un fel care este foarte puţin cunoscut.

Luând ca bază deocamdată comportarea staţionară, din datele experimentale cele mai sigure reprezentate în figurile 5 şi 6, rezultă o variaţie cu temperatura a coeficientului α până la 1000 °C, reprezentată în figura 11.

Cu linii întrerupte sunt reprezentate contribuţiile prin convecţie, cu o linie punctată contribuţia radiaţiei la coeficientul de cedare, factorul de radiaţie respectiv fiind ales $e = 0{,}8$ ceea ce corespunde oxidului de aluminiu. Diametrul

influențează ca parametru numai convecția. Suma celor două contribuții dă valoarea absolută a coeficientului total de cedare.

In figura 11 s'a introdus cu linii continue numai variația coeficientului pentru diametri de 1,10 și 30 mm. Valori intermediare se pot obține cu ușurință din diagramă.

Funcția de temperatură a capacității termice γc se cunoaște exact din datele expuse la punctul 8. Această funcție este reprezentată grafic în figura 8.

Făcând operațiile de calcul grafic pe hârtie logaritmică, poate fi obținută funcția de temperatură a coeficientului termenului al doilea, al cărui invers este tocmai constanta de timp a cedării de căldură.

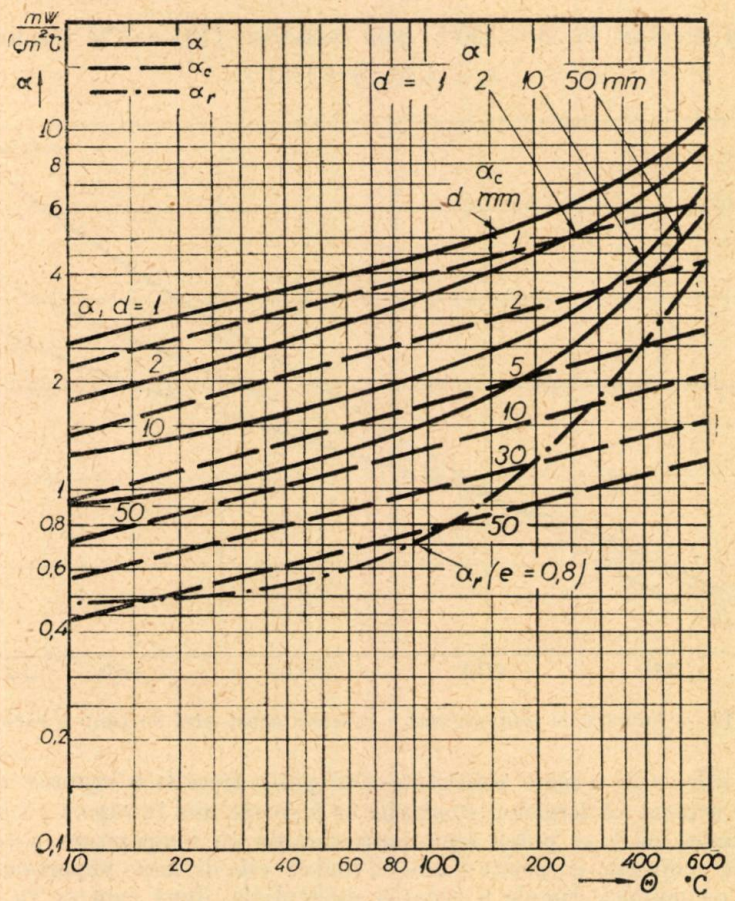

Fig. 11. — Variația coeficientului total de cedare a căldurii cu temperatura.

Se constată că variația cu temperatura este mai puțin pronunțată la fire subțiri și mai mare la fire mai groase. Aceasta se datorește faptului verificabil în figura 10 că cedarea prin convecție a firelor subțiri devine mare față de contribuția radiației, pe când la firele cu diametri mai mari cele două componente au același ordin de mărime la temperatura normală, astfel încât variația cu puterea a patra a temperaturii a radiației, influențează hotărîtor coeficientul total de cedare.

In figura 12 s'au reprezentat în scări liniare două funcţii de temperatură a inversei constantei de timp a cedării pentru un conductor de 1 şi de 50 mm diametru. Se vede imediat că aceste curbe de curbură contrarie pot fi înlocuite cu o aproximaţie suficientă cu o dreaptă în diagramă. Coeficientul liniar de variaţie a funcţiei de temperatură se deduce din expresia:

$$f(\vartheta) = 1 + \delta_1 \vartheta,$$

Pentru toate diametrele rezultă astfel din datele diagramei

$$\delta_1 = \frac{1}{\vartheta}[f(\vartheta) - 1].$$

Dreapta trecând la $\vartheta = 500°C$ prin valoarea $f(\vartheta) = 3{,}23$ rezultă

$$\delta_1 = 4{,}46.10^{-3}\ 1/°C.$$

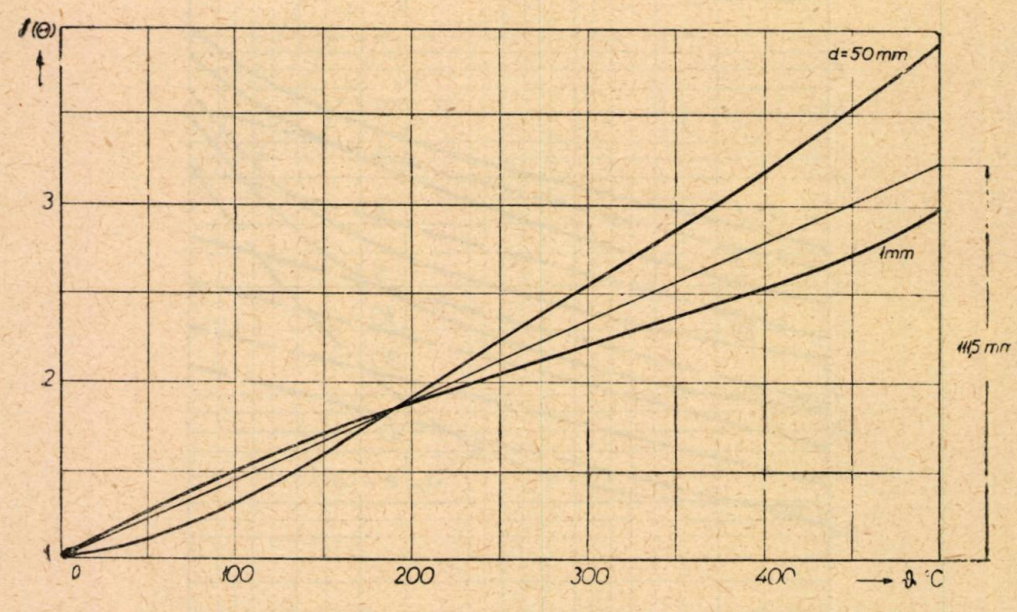

Fig. 12. — Funcţia de temperatură a inversei constantei de timp a răcirii.

Pentru calcule de o mare exactitate s'ar putea trece la o expresie de gradul 2, dar este evident că termenul cuadratic ar fi foarte mic în raport cu cel liniar.

Posibilitatea de a se putea reprezenta variaţia cu temperatura a constantei de timp sau a inversei ei, printr'o funcţie liniară este de mare importanţă pentru rezolvarea cu mijloace simple a ecuaţiei diferenţiale, după cum se va vedea în cele ce urmează.

14. Rezolvarea ecuaţiei diferenţiale a încălzirii

Ecuaţia diferenţială (38) poate fi rezolvată cu uşurinţă dacă funcţiile care reprezintă dependenţele coeficienţilor sunt suficient de simple. Un procedeu util este de a se pleca dela cele mai simple ipoteze fizice, pentru a se trece la aproximaţii tot mai bune, care reproduc fenomenul până la sfârşit cu o exactitate suficientă [23].

a) Fie coeficienții constanți. Constanta de timp a fenomenului este inversul coeficientului termenului al doilea în (38) adică

$$T = \frac{\gamma c}{\alpha} \frac{s}{p} = \frac{\gamma c\, d}{4\alpha}. \tag{50}$$

Expresia

$$G = j^2 \frac{\rho}{\gamma c} \tag{51}$$

care are dimensiunea [°C/s] poate fi numită intensitatea de încălzire. Cu aceste notații, ecuația (38) pentru supratemperatura θ se reduce la

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{T} = G, \tag{52}$$

a cărei soluție pentru condiția inițială $\theta = 0$ la $t = 0$ este

$$\theta = \Theta\,(1 - e^{-\tau}), \tag{53}$$

unde s'a notat temperatura staționară prin $\Theta = GT = j^2 \frac{\rho d}{4\alpha}$, (54)

iar timpul numeric prin $\tau = \frac{t}{T}$.

Conform celor expuse mai sus, panta unică pentru toate curbele de încălzire este

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_0 = G_0 = j^2 \frac{\rho}{\gamma c}. \tag{55}$$

Aceste rezultate foarte simple nu țin seama bineînțeles de variația cu temperatura a parametrilor și de funcția de timp a curentului $f(t)$. Aceasta din urmă poate să fie introdusă în calcul, soluția ecuației (52) devenind în acest caz

$$\vartheta = e^{-\tau} \left\{ G \int f^2(t)\, e^{\tau}\, dt + C \right\}. \tag{56}$$

Constanta de integrare se stabilește din condiția inițială.

b) Fie termenul de încălzire ϑ funcție lineară de temperatură. In cazul când densitatea de curent poate fi considerată constantă, ecuația (52) devine

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\vartheta}{T} = G(1 + \varepsilon)\,\theta \tag{57}$$

sau

$$\frac{d\vartheta}{dt} + \left(\frac{1}{T} + \varepsilon G\right)\vartheta = G. \tag{58}$$

Aceasta este o ecuație similară cu (52) pentru constanta de timp

$$T_1 = \frac{T}{1 - \varepsilon G T}. \tag{59}$$

Temperatura staţionară este

$$\Theta = AT_1 = \frac{AT}{1 - \varepsilon AT} = \frac{\Theta}{1 - \varepsilon\Theta}. \tag{60}$$

Din această formulă se vede imediat în ce sens este influenţată temperatura staţionară de către variaţia rezistivităţii.

Intr'adevăr, dat fiind că $\varepsilon = 3{,}44.10^{-3}$ pentru aluminiu se vede că la $\Theta = 200°C$ aproximaţia nouă dă

$$\Theta = \frac{200}{1 - 0{,}688} = 640°C.$$

Soluţia ecuaţiei (58) este deci, luând în considerare (59) şi (60),

$$\vartheta = \frac{\Theta}{1 - \varepsilon\Theta}\left(1 - e^{-(1-\varepsilon\Theta)\tau_1}\right). \tag{61}$$

Din această ecuaţie reiese că temperatura staţionară definită de (54) are un rol important şi în fenomenul cu parametri variabili. Intr'adevăr Θ poate avea două valori speciale. Una rezultă din condiţia $\varepsilon\Theta = 1$ şi este pentru aluminiu $\Theta = 291°C$, pentru care temperatura creşte liniar, până la infinit, deci nu mai există o temperatură staţionară finită. A doua valoare este $\Theta = \infty$ sau $\alpha = 0$, ceea ce înseamnă încălzire fără nicio pierdere de căldură. Acest caz va fi examinat în mod special mai jos.

Făcând densitatea curentului să varieze cu timpul, soluţia (61) trebue înlocuită cu:

$$\vartheta = e^{-\int \frac{dt}{T_1}}\left\{\int G(t)\, e^{-\int \frac{dt}{T_1}} dt + C_1\right\}, \tag{62}$$

a cărei rezolvare depinde de posibilitatea de a calcula integralele. Constanta C_1 se stabileşte din condiţia iniţială.

Dar această aproximaţie nu este încă satisfăcătoare, deoarece termenul de încălzire are în realitate o variaţie cu temperatura, care nu poate fi reprezentată suficient de exact printr'o expresie lineară.

c) Dacă se consideră, conform relaţiei (43), o funcţie cuadratică de temperatura pentru variaţia termenului liber în (52), atunci se poate admite, fără a se complica problema matematică, o funcţie lineară de variaţie a constantei de timp.

Ecuaţia diferenţială (52) devine

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1 + \delta\vartheta}{T}\vartheta = G_0(1 + \varepsilon_1\vartheta - \varepsilon_2\vartheta^2) \tag{63}$$

şi se reduce la

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a\vartheta^2 + b\vartheta + c, \tag{64}$$

cu notaţiile

$$\begin{aligned} a &= -\left(\frac{\delta}{T} + \varepsilon_2 G\right) = -\frac{\delta + \varepsilon_2\Theta}{T}, \\ b &= \frac{1}{2}\left(\varepsilon_1 G - \frac{1}{T}\right) = \frac{\varepsilon_1\Theta - 1}{2T} \\ c &= \frac{\Theta}{T}. \end{aligned} \tag{65}$$

Ecuația (64) poate fi integrată printr'o cuadratură, deoarece coeficienții ei sunt constanți. Forma soluției depinde de semnul discriminantului

$$\Delta = \frac{1}{4}\left(\varepsilon_1 G - \frac{1}{T}\right)^2 + G\left(\frac{\delta}{T} + \varepsilon_2 G\right), \tag{66}$$

care rămâne esențial pozitiv.

Soluția se exprimă în acest caz prin tangenta hiperbolică și este

$$t = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \cdot \left\{ \operatorname{artgh} \frac{b}{\sqrt{\Delta}} - \operatorname{artgh} \frac{b + a\vartheta}{\sqrt{\Delta}} \right\} \tag{67}$$

care se poate reduce la

$$t = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \operatorname{artgh} \frac{\vartheta\sqrt{\Delta}}{c + b\vartheta}$$

și se poate inversa rezultând

$$\vartheta = \frac{G}{\sqrt{\Delta} \operatorname{ct\,gh}\ (t\sqrt{\Delta}) - b} \cdot \tag{68}$$

In acest caz nu mai pot apare încălziri cu pantă constantă.

Din soluție se vede că dacă G, adică densitatea este mică, atunci $\varepsilon_1 A < \frac{1}{T}$ și b devine negativ. In acest caz temperatura nu depășește anumite valori, deoarece numitorul crește. La curenți mari $b > 0$ și temperaturile cresc. Forma curbelor de încălzire este cea a tangentei hiperbolice.

Variații în timp a curentului duc la o ecuație de tip Riccati

$$\frac{d\vartheta}{dt} = p(t)\,\vartheta^2 + q(t)\,\vartheta + r(t). \tag{69}$$

care nu poate fi rezolvată în mod general decât dacă se cunoaște cel puțin o integrală particulară.

Prin aceasta s'a ajuns aproape de limita posibilităților analitice de a se urmări fenomenul în toate detaliile [17].

Sugestii noi pentru tratarea matematică nu pot să apară decât din experiențe.

15. Calculul temperaturilor staționare

In cele de mai sus s'a arătat că temperatura staționară la sarcini de curent constante este o mărime care intră în multe expresii analitice, caracterizând încălzirea conductorilor. Cunoscând pe de o parte variația cu temperatura a parametrilor, iar de altă parte relațiile teoretice, valoarea temperaturii staționare se poate stabili cu o exactitate suficientă [17].

Formula fundamentală este pentru fire rotunde

$$\Theta = j^2 \frac{\rho}{\alpha} \frac{d}{4} \cdot \tag{70}$$

După cum se consideră variația cu temperatura a parametrilor din termenul al doilea, adică a mărimii ρ/α, rezultă următoarele patru alternative importante.

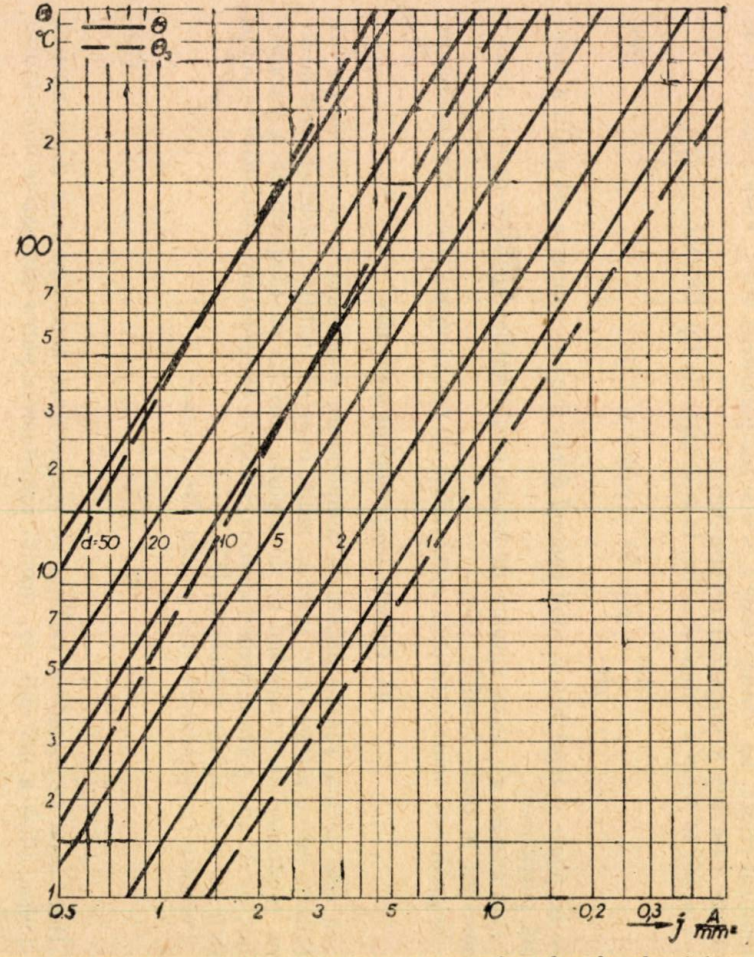

Fig. 13. — Temperatura staţionară a conductelor de aluminiu cu parametrii constanţi (Θ) şi variabili (Θ_2).

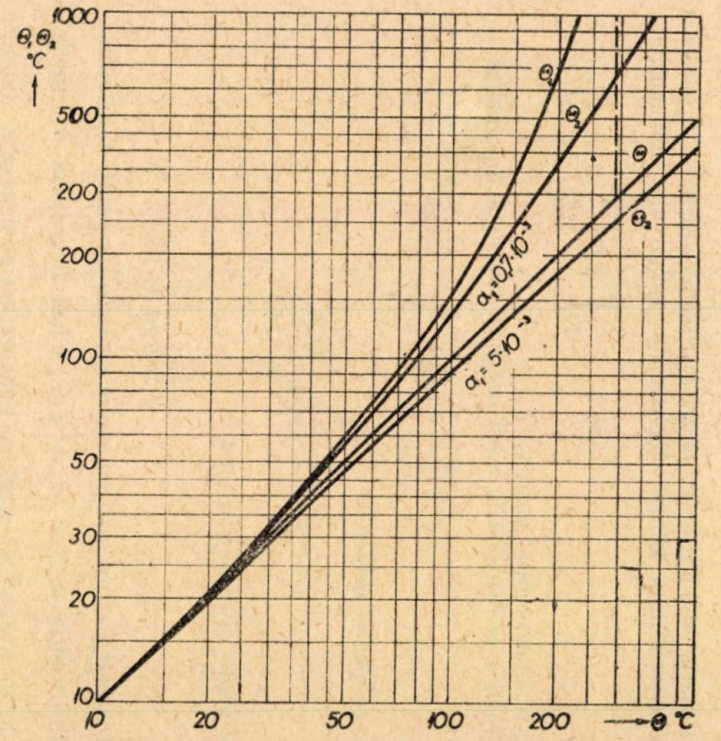

Fig. 14. Comparaţia metodelor de calcul ale temperaturii staţionare.

a) Mărimea ρ/α se consideră constantă. Valoarea absolută a mărimilor ρ și α se poate considera la 0, 20°C sau la temperatura ambiantă maximă prevăzută de prescripții, anume 35°C în zonele temperate.

După A. S. Zaimovschi și V. V. Usov [1] pentru aluminiu electrolitic (conductori)

$$\rho_{20} = 0{,}02828\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$
$$\rho_0 = 0{,}02600\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$
$$\rho_{15} = 0{,}0300\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}.$$

Valoarea α depinde de supratemperatura θ și de diametru, conform unor relații precizate mai sus. Limitând fenomenul la temperaturi la care contribuția radiației poate fi neglijată, se poate scrie

$$\alpha = k\left(\frac{\theta}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{71}$$

Valoarea numerică a coeficientului k poate fi dedusă din valorile confirmate experimental ale coeficientului de cedare a căldurii α. Făcând calculele rezultă că valoarea k nu este constantă, dar că pentru diametri cuprinși între $d = 5$ și 30 mm și supratemperaturi de $\theta = 10 - 300$°C ea variază puțin în jurul valorii medii

$$k = 0{,}625.10^{-3},$$

valabilă exact pentru $\theta = 50$°C.

Introducând această valoare în (70) și (71) rezultă temperatura staționară

$$\Theta = \left[j^2 \frac{\rho_{35}}{4k}\right]^{4/5} d = \left[j^2 \frac{\rho_{35}\, 10^3}{2{,}5}\right]^{4/5} d, \tag{72}$$

unde d se introduce în cm. Făcând calculele, rezultă diagrama dublă logaritmică din figura 13, dreptele trasate cu linii continue având diametrul d(mm) ca parametru.

b) Mărimea ρ/α variază aproximativ liniar cu temperatura, coeficientul de variație fiind $\delta = 0{,}045°C^{-1}$. Considerând temperatura ambiantă de 35°C și supratemperatura θ începând cu această valoare, rezultă o altă temperatură staționară [17]:

$$\Theta_1 = j^2 \frac{d}{4}\left(\frac{\rho}{\alpha}\right)_{35} (1 + \delta\,\Theta). \tag{73}$$

Valoarea coeficientului liniar δ fiind pozitivă, rezultă $\Theta_1 > \Theta$, mai ales la temperaturi înalte.

In diagrama din figura 14 s'a reprezentat relația (73) în funcție de temperatura staționară Θ. Se vede că la o valoarea $\Theta = 200$°C se atinge de fapt temperatura de fuziune a aluminiului. Expresia (72) poate fi utilizată numai la supratemperaturi neîntrecând 40°C.

c) Valori mai exacte ale temperaturii staționare se obțin din soluțiile generale ale ecuației diferențiale (52) a încălzirii, ținând seama de variația parametrilor cu temperatura după o funcție de gradul 2.

Utilizând formula (68) temperatura staționară se scrie, din cauza limitei ctgh $\infty = 1$,

$$\Theta_2 = \frac{C}{\sqrt{\Delta - b}}. \tag{74}$$

La calculul acestei expresii interesează valorile pe care le ia coeficientul a, care intră în discriminant şi care caracterizează în special factorul de radiaţie. In diagrama din figura 14 s'a făcut o comparaţie între formulele (72), (73) şi (74), temperaturile staţionare rezultante notându-se cu Θ, Θ_1 şi Θ_2, ultima fiind calculată pentru o valoare redusă a radiaţiei ($a = 0{,}7.10^{-3}$) şi o valoare relativ mare a radiaţiei ($a = 5.10^{-3}$). Se vede că în acest din urmă caz temperatura staţionară Θ_3 are valori mai mici decât temperatura Θ.

d) Mărimea ρ/α variază cu temperatura după valori constatate experimental. Cu ajutorul diagramei din figura 16 pot fi stabilite valorile α în funcţie de supratemperatură şi de diametru. Introducând aceste valori şi valorile rezistivităţii la temperaturi date în relaţia (70), poate fi obţinută relaţia între densitatea de curent şi temperatura staţionară, ţinându-se seama de variaţia reală a parametrilor cu temperatura.

Aceste valori însemnate cu Θ_3 au fost trecute în diagrama din figura 13 cu linii întrerupte pentru diametri de $d = 1{,}10$ şi 50 mm $\varnothing$.

Valorile Θ_3 se înşiră tot pe drepte în diagramă, având însă o pantă mai mare, ceea ce corespunde cu realitatea, deoarece în formula (70) creşterea cu temperatura a rezistivităţii ρ este mai pronunţată decât cea a coeficientului de cedare α.

La conductorul de $d = 10$ mm valoarea reală Θ_3 şi cea de calcul Θ se suprapun exact la 35°C, pentru care s'a calculat temperatura staţionară.

Este de remarcat că în diagrama din figura 13 nu s'a ţinut seama de influenţa radiaţiei solare sau de mişcări forţate ale aerului. Din diagramele din figurile 2, 8 şi 11 se pot stabili însă cu uşurinţă aceste influenţe, dacă se cere o urmărire exactă a fenomenelor în condiţiile atmosferice reale.

16. Calculul încălzirii fără cedare de căldură

Dacă încălzirea are loc atât de repede încât căldura cedată poate fi neglijată faţă de cea înmagazinată în conductor, atunci ridicarea temperaturii se face după relaţia (40). Ordonând termenii după dependenţa de temperatură sau de timp, rezultă

$$\left(\frac{\gamma c}{\rho}\right)_{\vartheta} \cdot \mathrm{d}\vartheta = j_t^2 \, \mathrm{d}t. \tag{75}$$

Este foarte important faptul că având numai doi termeni, separarea funcţiilor de temperatură şi de timp se poate face oricând [23], indiferent de forma analitică a funcţiilor respective.

Considerând intensitatea curentului independentă de mici variaţii ale parametrilor conductorilor, dintr'o analiză rezultă că integrarea se face asupra expresiilor

$$\left(\frac{\gamma c}{\rho}\right)_0 \int_0^{\vartheta} \left(\frac{\psi c}{\varphi}\right)_{\vartheta} \mathrm{d}\vartheta = j_0^2 \int_0^t f^2(t)\mathrm{d}t, \tag{76}$$

unde ψ este funcţia de temperatură a dilataţiei liniare j_0 densitatea de curent referită la secţiunea iniţială, iar (t) este funcţia de timp a curentului.

Integrala din dreapta se poate numi « efectul termic » al curentului.

a) Calculul analitic al ambelor integrale se poate face cu uşurinţă dacă se cunosc funcţiile de variaţie ale integranzilor. Din cele expuse la punctul 13 putem

să scriem

$$\left(\frac{\rho}{\psi c}\right)_{\vartheta} = 1 + \varepsilon_1 \vartheta - \varepsilon_2 \vartheta^2, \tag{77}$$

unde, după calculele autorului pentru aluminiu, coeficienților li se pot da valorile $\varepsilon_1 = 3{,}5.10^{-3}$, $\varepsilon_2 = 1{,}14.10^{-6}$.

Integrala de temperatură poate fi rezolvată dacă se cunoaște semnul discriminantului

$$D = -\varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_1^2}{4}, \tag{78}$$

care este întotdeauna negativ. Rezultă astfel [25]

$$\int_0^{\vartheta} \frac{a\vartheta}{1 + \varepsilon_1 \vartheta - \varepsilon_2 \vartheta^2} = \frac{1}{2\sqrt{D}} \left[[ln] \frac{\sqrt{D} - \frac{\varepsilon_1}{2} + \varepsilon_2 \vartheta}{\sqrt{D} + \frac{\varepsilon_1}{2} - \varepsilon_2 \vartheta} - [ln] \frac{\sqrt{D} - \frac{\varepsilon_1}{2}}{\sqrt{D} + \frac{\varepsilon_1}{2}} \right]. \tag{79}$$

Integrale de timp corespunzătoare curenților de scurtcircuit în (76) au fost indicate în relațiile (44—46). Funcții mai complicate au fost calculate și publicate de autor [23], [24].

Calculul decurge în modul următor: se stabilește mai întâi integrala de timp, apoi se caută temperatura care corespunde valorii respective a integralei. Din cauză că variabila ϑ intervine în limita integralei de temperatură, calculul nu poate fi simplificat în mod satisfăcător. Reprezentând grafic însă valoarea integralei (79) în funcție de temperatură, putem să scriem în locul ei integrala de timp și obținem astfel o curbă denumită curba de încălzire a metalului respectiv prin curent electric, fără cedare de căldură.

b) Calculul grafic permite a se stabili integralele (76) fără aproximații și ținând seama de variația reală a parametrilor cu temperatura. Pentru aceasta, după un procedeu al autorului, într'o diagramă cu o scară logaritmică se reprezintă grafic funcțiile de temperatură ale mărimilor ρ, γ, c, ψ, astfel cum se arată în figura 15. Se construește apoi grafic prin adițiuni și substracțiuni curba de temperatură a mărimii $\psi c/\rho$, astfel cum se vede în figura 15. Integrarea se poate face grafic dacă această funcție se trece pe o diagramă liniară.

Rezultatele integrării grafice care diferă cu mai puțin de 1% de cele ale integrării analitice sunt date în tabloul Nr. 8.

TABLOUL Nr. 8

Curba de încălzire a aluminiului

Temperatura °C	Efectul termic 10^3 A^2s/mm^4
0	0
50	4,28
100	7,58
200	13,50
300	18,35
400	22,45
500	26,10
600	29,35

In figura 16 s'au comparat curbele de încălzire ale aluminiului şi cuprului, calculate tot de autor [23]. Se constată că aluminiul este ridicat mult mai repede la temperaturi înalte decât cuprul de efectul termic al curentului. Dacă se ia însă în considerare că un conductor din aluminiu nu se încarcă decât cu 60% din densitatea de curent normală pentru conductorul din cupru, se evidenţiază atunci o

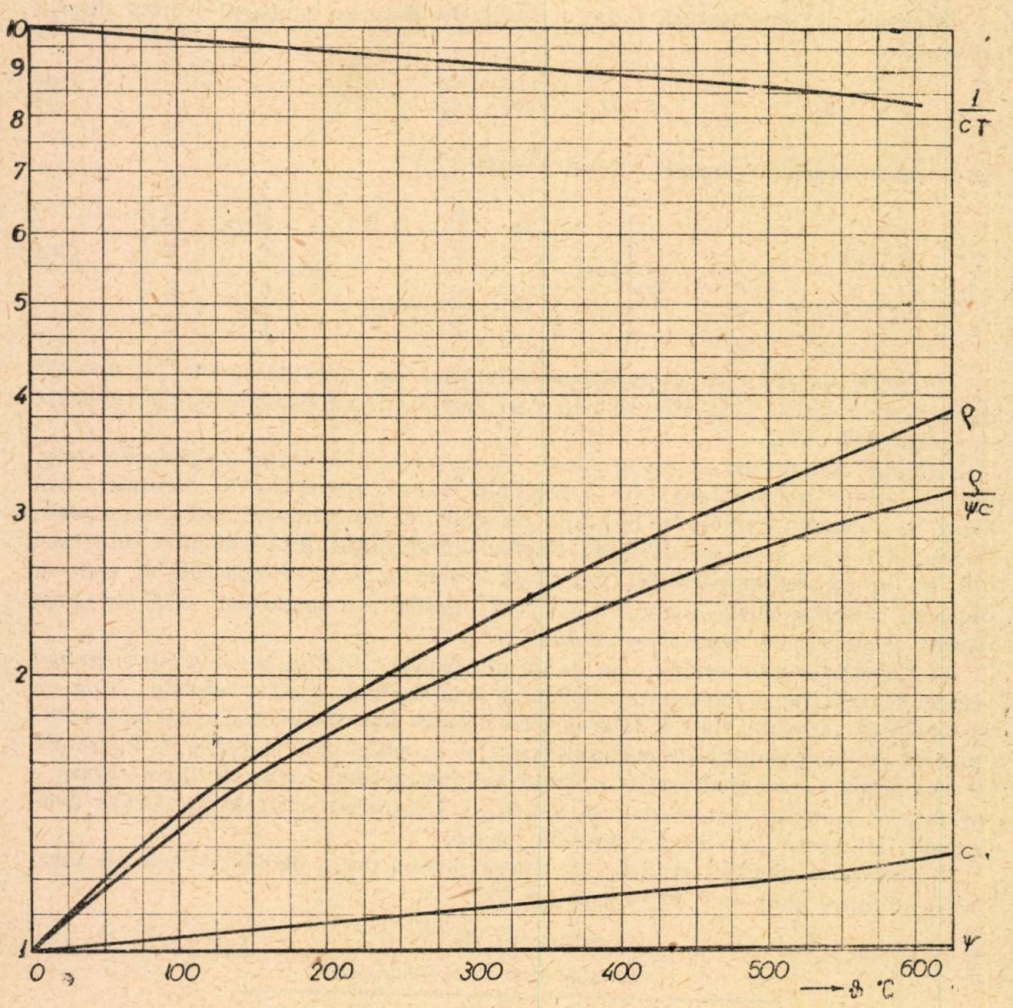

Fig. 15. — Variaţia mărimii $\rho/\Psi c$ cu temperatura.

comportare similară cu cea a cuprului, datorită mai ales căldurii specifice mult mai mari a aluminiului.

Bineînţeles că la cercetări exacte valorile din tabloul Nr. 8 sunt de preferat faţă de cele din figura 16.

Aceste valori sunt foarte importante pentru studiul comportării conductorilor la scurtcircuit [25].

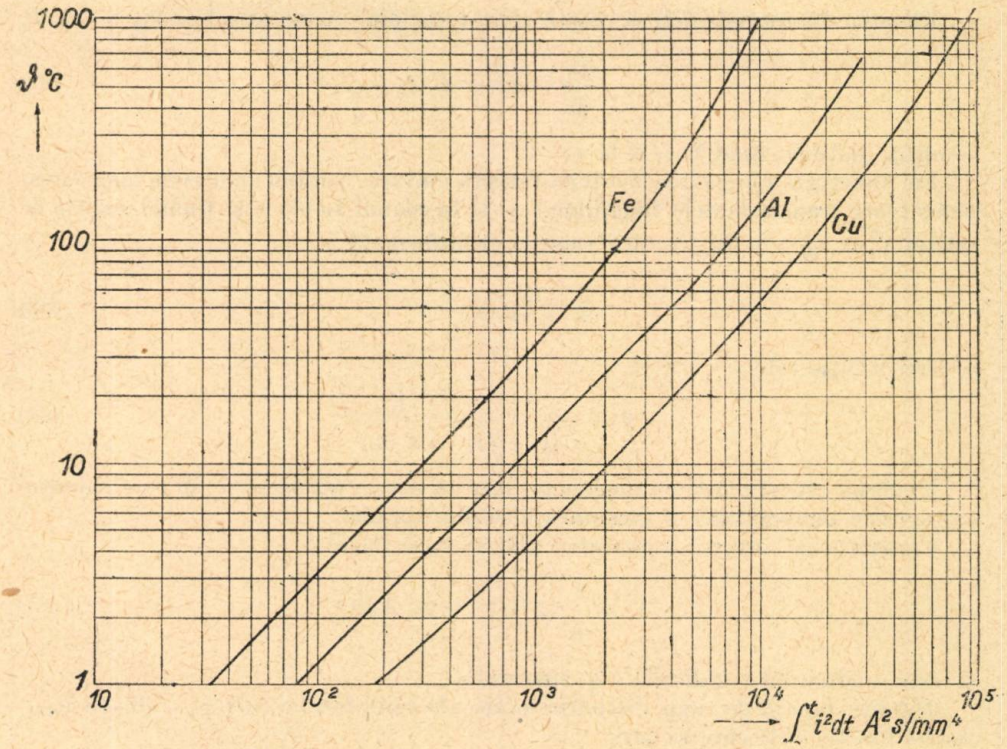

Fig. 16. — Încălzirea fără cedare de căldură pentru fier, aluminiu şi cupru.

17. Calculul încălzirii tranzitorii

Fenomenul tranzitoriu al încălzirii apare imediat după o schimbare bruscă a uneia din mărimile fizice care influenţează bilanţul energetic staţionar. Pe când stările staţionare se menţin de obicei de forţele aplicate, trecerea dintr'o stare staţionară în alta se face după parametrii proprii, iar la sistemele elastice după oscilaţiile proprii ale sistemului. Din această cauză este important a se pune în evidenţă comportarea oricărui sistem echilibrat la schimbări discontinue ale parametrilor de stare sau a forţelor exterioare.

Pentru rezolvarea ecuaţiilor diferenţiale ale încălzirii date la punctele 10 şi 11, s'au indicat şi soluţii ca (56) şi (62), care se referă la cazul când densitatea de curent variază în timp. Cazul când variaţiile în timp ale temperaturii şi ale curentului sunt de acelaşi ordin de mărime cu constantele de timp proprii ale sistemului, merită o atenţie deosebită.

Instrumentul matematic cel mai potrivit pentru studiul fenomenelor tranzitorii pure este transformaţia funcţională a lui Laplace, întrebuinţată în cele ce urmează în forma sa clasică

$$\varphi(s) = \int_0^\infty f(t)\, e^{-st}\, dt \equiv \mathfrak{L}(t), \tag{80}$$

care la o aplicare corectă permite cele mai puţine riscuri de a se comite greşeli în calculul funcţional.

Ecuaţia diferenţială (52) se poate scrie principial cu notaţia $Y = \vartheta_1$, $\lambda = 1/T$,

$$\frac{dY}{dt} + \lambda Y = G(t) \tag{81}$$

condiţia iniţială fiind $Y = 0$ la $t = 0$.

Fie funcţia $G(t)$ egală la $t = 0$ cu treaptă unitară. Notând cu literele mici corespunzătoare transformatele funcţiilor Y şi G în planul Laplace şi ţinând seama de relaţia $Y'_t = sy + y(0)$, rezultă ecuaţia transformată

$$sy + \lambda y = \frac{1}{s}, \tag{82}$$

a cărei soluţie este

$$y = \frac{1}{s(s+\lambda)} = \frac{1}{sz(s)}. \tag{83}$$

Expresia este similară cu impedanţa într'un sistem pur electric, în care curentul corespunde temperaturii şi tensiunea efectului termic.

Transformata inversă a expresiei (83) se scrie imediat

$$Y = \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \equiv A(t) \tag{84}$$

şi este «admitanţa indicială» a sistemului.

Diferite funcţii de timp discontinue ale efectului termic $G(t)$ se tratează uşor. Astfel funcţia (44) care se scrie

$$G_1(t) = e^{-\eta t} U(t), \tag{85}$$

are transformata

$$g_1(s) = \frac{1}{s+\eta}, \tag{86}$$

şi soluţia imagine este

$$y_1(s) = \frac{1}{(s+\eta)(s+\lambda)}, \tag{87}$$

a cărei funcţie de timp este

$$Y_1 = \frac{1}{\eta - \lambda}(e^{-\eta t} - e^{-\lambda t}). \tag{88}$$

In sfârşit funcţia de timp (45)

$$G_2(t) = 1 - me^{-\eta t} \tag{89}$$

are transformata

$$g_2(s) = \frac{s + \eta - ms}{s(s+\eta)} \tag{90}$$

şi duce la soluţia imagine

$$y_2(s) = \frac{\alpha + (1-m)s}{s(s+\eta)(s+\lambda)}, \tag{91}$$

care descompusă în doi termeni și ținând seama că împărțirea cu parametrul înseamnă integrare dela 0 la t, se traduce invers în

$$Y_2(t) = \eta \int_0^t \frac{e^{-\eta t} - e^{-\lambda t}}{\eta - \lambda} dt + \frac{1-m}{\eta - \lambda}(e^{-\eta t} - e^{-\lambda t})$$
$$= \frac{1}{\eta - \lambda}\left\{1 - e^{-\eta t} - \frac{\eta}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) + (1+m)(e^{-\eta t} - e^{-\lambda t})\right\} \quad (92)$$

Din aceste expresii se vede imediat că stările tranzitorii apar mai evident atunci când coeficienții exponenților, adică constantele de timp ale sistemului termic și ale efectului intensității sunt de același ordin de mărime.

Funcții mai complicate de timp ale efectului termic se rezolvă printr'o simplă integrare, dacă se cunoaște admitanța indicială (84).

D. EXPERIENȚELE

18. Condițiile experiențelor

Din expunerea problemelor fizice care se întâmpină la încălzirea staționară și bruscă a conductorilor de aluminiu s'a constatat că în realitate încălzirea este un fenomen complex însoțit de obicei de o serie de fenomene auxiliare, care îngreunează analiza și urmărirea prin calcul, pe baza unor rețete simple a desfășurării fenomenului. S'a văzut că mai ales răcirea conductorilor depinde de un număr mare de parametri cu caracter local, a căror cunoaștere este indispensabilă pentru formularea și aplicarea precisă a calculelor. De aceea influența parametrilor de acest fel se stabilește cel mai ușor prin experiențe directe făcute numai în acest scop și nu prin calcule.

Considerații de acest fel duc cu necesitate la efectuarea de experiențe de laborator care să servească drept îndrumare cercetărilor analitice.

Pentru a corespunde cât mai mult scopului de a cerceta comportarea termică la scurtcircuite a conductorilor din aluminiu, experiențele ar fi trebuit să fie organizate și îndrumate într'un anumit fel, spre a se obține date cât mai sigure privind influența parametrilor ce depind de condiții locale, în speță influența oxidației, a schimbărilor structurale și influența răcirii la încălziri puternice de scurtă durată.

De fapt la executarea lor experiențele de care ne servim au avut un alt scop, anume acela de a contribui a precizarea variației cu temperatura a căldurii specifice a aluminiului.

Avându-se în vedere însă că în prezent valorile căldurii specifice se pot considera ca pe deplin și exact cunoscute până la punctul de topire [9], experiențele pot fi folosite pentru depistarea altor parametri și altor efecte, mai puțin cunoscute în fenomenul de încălzire. Reușita unor astfel de cercetări este favorizată de grija deosebită cu care s'au efectuat încercările și s'au făcut înregistrările, cât și de cunoașterea precisă a parametrilor de material ai eprubetelor.

In fond experiențele au constat din aplicarea de șocuri puternice de curent continuu unor fire de cupru și aluminiu și din înregistrarea oscilografică a variației intensității și a căderii de tensiune. Toți ceilalți parametri urmau a fi deduși, ceea ce este posibil. Puterea și energia electrică se deduc din produsul intensității și al tensiunei, respectiv integrala acestui produs în timp, iar temperatura din variația rezistenței electrice, calculate din câtul tensiunii și al curentului.

Oscilograful cu bucle a permis înregistrarea unor şocuri puternice şi reducerea consecutivă a duratei încălzirii. Făcându-se mai multe experienţe cu durată variabilă, poate fi dedusă influenţa parametrilor care depind de timp.

Eprubetele erau fire masive neizolate de aluminiu electrolitic trefilat la rece, destinate instalaţiilor electrice.

Condiţiile locale au fost însă oarecum speciale. Deoarece experienţele se extindeau la temperaturi foarte ridicate, de fapt până la punctul de topire, firul a fost înfăşurat pe un corp cilindric refractar, ceea ce a împiedecat deformări şi deplasări necontrolabile, mai ales în cazul topirii firului. De acest fapt trebue să se ţină seama la interpretarea rezultatelor.

19. Eprubetele

a) *Firele* masive din aluminiu electrolitic trefilat la rece şi corespunzând normelor curente au avut secţiuni nominale

$$s_1 = 2{,}5 \text{ şi } s_2 = 5 \text{ mm}^2$$

Secţiunea reală diferă de aceste date nominale, dat fiind că la trefilare, diametrului şi nu secţiunei i se dau valori rotunjite. Astfel din câte 16 măsurători cu micrometrul pe câte 4 diametri s'a constatat că diametrii medii corespunzători celor două secţiuni sunt:

$$d_1 = 1{,}750 \pm 0{,}0015 \text{ mm}$$
$$d_2 = 2{,}50 \pm 0{,}02 \text{ mm}.$$

Lungimea medie a eprubetelor a fost 2,5—5 m. S'a măsurat cu precizie numai lungimea între punctele de contact ale firelor de tensiune, spre a se putea stabili cu precizie rezistivitatea electrică.

Rezistivitatea s'a măsurat în două faze: între trefilarea la rece şi recoacerea de lungă durată la temperaturi peste 300°C.

Rezistenţa electrică a eprubetelor s'a măsurat până aproape de topire, atât plecând dela fire trefilate dur, cât şi dela fire recoapte. S'a constatat că oxidarea superficială nu a înaintat decât foarte puţin, astfel încât variaţia rezistenţei cu temperatura s'a stabilit cu precizie de $\pm$ 0,5%, făcându-se corecturile corespunzătoare oxidaţiei conform teoriei expuse la punctul 6.

b) *Corpurile refractare de susţinere* au fost întrebuinţate pentru a se da eprubetelor o stabilitate faţă de deformările termice la temperaturi mari şi la topire. Firele au fost înfăşurate pe aceste corpuri care servesc de obicei la încălzitoare electrice şi care au forma cilindrică de aproximativ 30 mm ⌀ şi 100 mm lungime având pe suprafaţă, un şanţ triunghiular de 4 mm adâncime, în spirală, pentru ghidarea firului de rezistenţă. Au fost utilizate două tipuri de corpuri refractare notate cu *A* şi *B* şi având respectiv 27 şi 30 de spire superficiale.

c) *Eprubeta* pregătită pentru experienţe se poate vedea în figura 17. La capetele firului s'a dispus un laţ dintr'un fir de aluminiu de 1 mm diametru care serveşte la măsurarea tensiunii. S'a constatat că până la punctul de topire al aluminiului acest contact s'a menţinut punctiform şi continuu, extinderea lui axială fiind de cel mult 0,3 mm faţă de o lungime de peste 2 m a firului de încercat.

Firele principale şi de tensiune au fost introduse în ţevi de protecţie din porţelan spre a le feri de încălziri excesive. Se ştie că în puntea dublă sau la măsurători de tensiune, o variaţie limitată a rezistenţei firelor de tensiune datorită unei încăl-

ziri locale nu poate da decât erori neglijabile, deoarece prin variație nu se modifică valorile cu două ordine de mărime mai mari ale rezistențelor din același circuit.

In cursul experiențelor eprubeta era susținută de o bară de fier de 10 mm diametru, care trecea prin centrul refractar, fără a atinge firele.

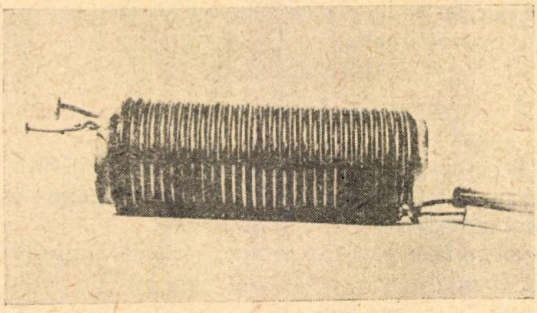

Fig. 17. — Eprubetă. Fir de aluminiu 5 mm² pe un corp cilindric refractar tip B.

d) Datele fizice ale eprubetelor s'au stabilit prin măsurători și calcule bazate pe măsurători.

In total s'au cercetat opt eprubete dintre care două (Nr. 6 și 7) la încălzire staționară și șase la încălzire de scurtcircuit.

Datele geometrice și mecanice ale eprubetelor, anume numărul eprubetei, secțiunea nominală s_n, și cea reală s, cât și greutatea măsurată după experiențe, au fost trecute în tabloul Nr. 9. Lungimea firului a fost măsurată sau a fost dedusă

TABLOUL Nr. 9
Datele eprubetelor

Nr. crt.	Epr. Nr.	Corp tip.	s_n mm²	s mm²	G g	l m
1	3	A	5,0	4,906	30,50	2,225
2	5	B	2,5	2,405	18,50	2,750
3	6	B	2,5	2,405	18,50	2,750
4	7	B	5,0	4,906	31,65	2,390
5	10	A	2,5	2,405	12,15	1,883
6	11	A	2,5	2,405	12,15	1,883
7	12	B	5,0	4,906	33,62	2,540
8	17	B	5,0	4,906	34,24	2,597

TABLOUL Nr. 10
Rezistența electrică ale eprubetelor

Nr. crt.	Epr. Nr.	s_n mm²	ϑ_0 °C	R_ϑ Ω	R_0 Ω
1	3	5	20	0,01303	0,01215
2	5	2,5	15	0,03420	0,03230
3	6	2,5	15	0,02220	0,02075
4	7	5	15	0,01497	0,01400
5	10	2,5	19,5	0,02182	0,02022
6	11	2,5	19,5	0,02296	0,02025
7	12	5	22	0,01500	0,01377
8	17	5	22	0,01582	0,01452

din greutate, secţiune şi densitate de 2,7, mai sigur decât printr'o măsurătoare de rezistenţă, din cauză că rezistivitatea variază cu prelucrarea.

Rezistenţa electrică a fiecărei eprubete s'a măsurat înainte de experienţe la temperatura camerei ϑ_0 calculându-se apoi rezistenţa corespunzătoare la 0°C. Datele respective au fost trecute în tabloul Nr. 10.

Valorile rezistenţelor la temperatura camerei servesc pentru control la măsurătorile de încălzire la scurtcircuit.

20. Măsurători de rezistivitate

Inainte şi după fiecare experienţă de încălzire la temperaturi ridicate au fost făcute măsurători de rezistivitatea materialului la temperatura camerei şi a fost stabilită prin calcul conductivitatea la 0 şi 20°C.

In cele ce urmează se dau rezultatele unei serii de măsurători de acest fel pe o eprubetă Nr. 3 de 5 mm².

Diametrul măsurat $d = 2{,}500$ mm.

Temperatura medie a camerei $\vartheta_0 = 18°C$.

Valorile rezistenţei măsurate la puntea dublă cu o rezistenţă etalon de $R_N = 0{,}01\ \Omega$ sunt trecute în tabloul Nr. 11.

TABLOUL Nr. 11

Rezistenţa eprubetei Nr. 3 înainte de încălzire

Nr.	Intensitate A	Rezistenţa Ω
1	1,0	0,013015
2	2,0	0,013025
3	3,0	0,013030
4	4,0	0,013032

Din examinarea valorilor măsurate rezultă că rezistenţa creşte din cauza efectului termic al curentului de măsură. Prin calcule de interpolare s'a stabilit că rezistenţa la 20°C este

$$R_{20} = 0{,}013025\ \Omega$$

Rezultă că

$$\rho_{20} = 0{,}2875\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$

$$\varkappa_{20} = \frac{1}{\rho_{20}} = 34{,}8\ \text{S m/mm}^2.$$

Cu un coeficient de temperatură $\alpha_R = 0{,}0040$ la 20°C

$$R_0 = 0{,}01215\ \Omega$$

$$\rho_0 = 0{,}02680\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$

$$\varkappa_0 = 37{,}3\ \text{S m/mm}^2.$$

După o încălzire prelungită la temperaturi peste 400°C aceeaşi eprubetă a fost măsurată din nou, rezultând pentru diametru, secţiune şi lungime aceleaşi valori.

Valorile rezistenței măsurate cu puntea dublă în aceleași condiții sunt cele din tabloul Nr. 12.

TABLOUL Nr. 12

Rezistența eprubetei Nr. 3 după încălzire

Nr. crt.	Intensitate A	Rezistența Ω
1	1,0	0,01322
2	2,0	0,01322
3	3,0	0,01323
4	4,0	0,01323

Rezultă

$$R_{18} = 0{,}013225\ \Omega$$
$$\rho_{18} = 0{,}0292\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$
$$R_0 = 0{,}01232\ \Omega$$
$$\rho_0 = 0{,}0272\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$$
$$\varkappa_0 = 36{,}7\ S\ \text{m/mm}^2.$$

Rezultatele oglindesc simultan două efecte: influența recristalizării și cea a oxidației, care acționează antagonist. Separarea acestor două efecte concomitente nu se poate face decât printr'o analiză ulterioară mai detaliată a fenomenelor. Este însă evident că în acest caz oxidarea a avut o influență mai mare asupra rezistenței electrice.

21. Măsurători de încălzire staționară

Spre a se putea stabili puterea de disipație a eprubetelor la temperaturi ridicate, au fost întreprinse măsurători de disipație în regim staționar. Eprubetele au fost dispuse ca în toate celelalte măsurători și alimentate cu curenți continui de valoare constantă. Intensitatea curentului și căderea de tensiune pe eprubete a fost măsurată cu instrumente de precizie cu cadru mobil de clasa 0,5.

TABLOUL Nr. 13

Valorile măsurătorilor la încălzire staționară

Nr. crt.	Expr. Nr.	U V	I A	P W	R Ω
1		2,00	50	100	0,0400
2	6	3,60	58	209	0,0621
3		8,50	60	510	0,1420
4		1,63	71	115,7	0,0229
5	7	1,95	68	132,5	0,0287
6		4,55	68	309,0	0,0670

Experiențele au fost efectuate cu eprubetele Nr. 6 și 7 și au dat rezultatele de citire consemnate în tabloul Nr. 13.

Interpretarea acestor rezultate se va face mai jos.

22. Măsurători de încălzire la scurtcircuit

a) *Principiul măsurătorilor* a fost același ca și cel de la încălzirea staționară, cu diferența că având în vedere viteza cu care se desfășoară fenomenele, măsurătorile de tensiune și intensitatea au fost înregistrate cu ajutorul unui oscilograf cu 4 bucle, împreună cu o bază de timp.

Schema electrică, de altfel foarte simplă, a dispozitivelor de măsură se vede în figura 18.

b) *Aparatura.* Drept sursă de curent a servit o baterie de acumulatori de 1000 Ah din 15 elemente în serie, care se putea încărca cu 2000 A. Căile de curent principale au fost dimensionate în consecință pentru curenți de 2000 A. Rezistența în serie cu eprubeta a fost de 1 sau 2 ohmi și 1000 A. Ea rămânea constantă în timpul unei încercări.

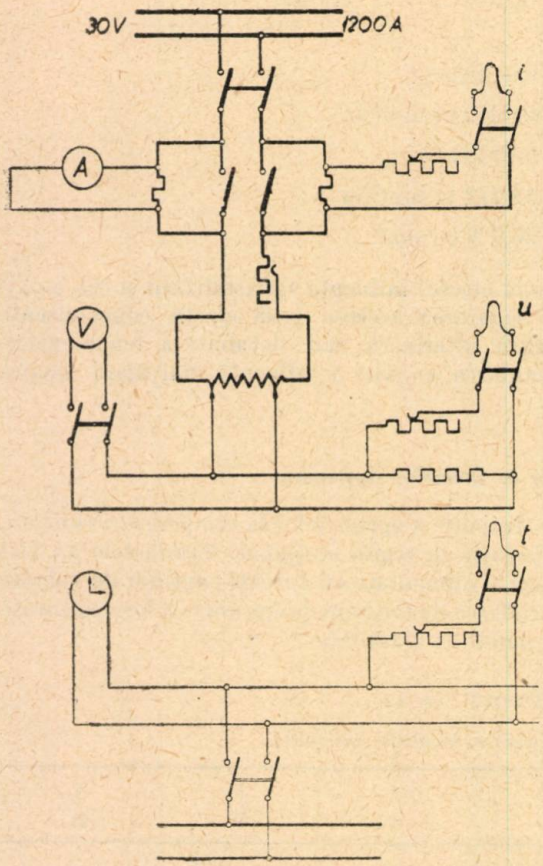

Fig. 18. — Schema electrică a dispozitivului de măsură.

Oscilograful a fost etalonat înainte și după măsurători. Etalonarea care s'a efectuat cu 0,5% exactitate a arătat că buclele dau deviații perfect proporționale cu intensitatea, respectiv cu tensiunea. Drept etalon au servit instrumentele cu cadru mobil de clasa 0,2, legate în paralel pe circuitele respective ale eprubetei.

c) *Efectuarea măsurătorilor* a fost făcută în ordinea următoare:

Prin încercări prealabile cu eprubete similare au fost stabilite valorile extreme ale căderii de tensiune, la bornele de tensiune ale eprubetelor și a shuntului de măsură, reglându-se rezistențele în serie și în derivație ale buclelor oscilografului:

— A urmat o etalonare a buclelor cu cel puțin două valori ale tensiunii și intensității;

— A fost făcută o măsurătoare principală, înregistrând o oscilogramă;

— A urmat apoi o nouă etalonare cu cel puțin două valori ale tensiunii și intensității.

In cursul încercărilor principale s'a încercat de fiecare dată să se atingă punctul de fuziune al metalului, spre a se avea astfel un control al temperaturii. Aceasta a reușit în general în 70% din cazuri. Locul de topire se afla în general între punctele

de măsurare a tensiunii eprubetei. In aceste cazuri după întreruperea curentului tensiunea înregistrată sărea la valoarea tensiunii în gol. In unele cazuri fuziunea a avut loc în exteriorul intervalului de măsură, dar în orice caz în imediata apropiere a unui punct de măsură al tensiunei, astfel încât se poate presupune că temperatura eprubetei a fost foarte apropiată de punctul de topire. Se știe de altfel că porțiunile înconjurate numai de aer dela capetele corpurilor refractare disipă cel mai puțin căldura și sunt mai periclitate de a se topi decât porțiunile care sunt în contact cu corpul refractar.

Oscilogramele au fost numerotate, corespondența între eprubete și oscilograme fiind dată în tabloul Nr. 14, împreună cu timpul total de încălzire până la topire.

TABLOUL Nr. 14

Lista oscilogramelor

Nr. crt.	Osc. Nr.	Epr. Nr.	s_n mm²	t s	I_{max} A
1	1	3	5	8,0	590
2	3	5	2,5	7,0	345
3	10	12	5	3,2	870
4	14	10	2,5	4,0	690
5	15	11	2,5	2,0	690
6	22	17	5	2,5	990

Din tabloul Nr. 14 se vede că s'a căutat ca timpul să fie micșorat la minimum posibil, ajungându-se la topirea firului dela 8 la 2 secunde. Această variație a timpului de topire va permite a se analiza influența mărimilor care depind de timp.

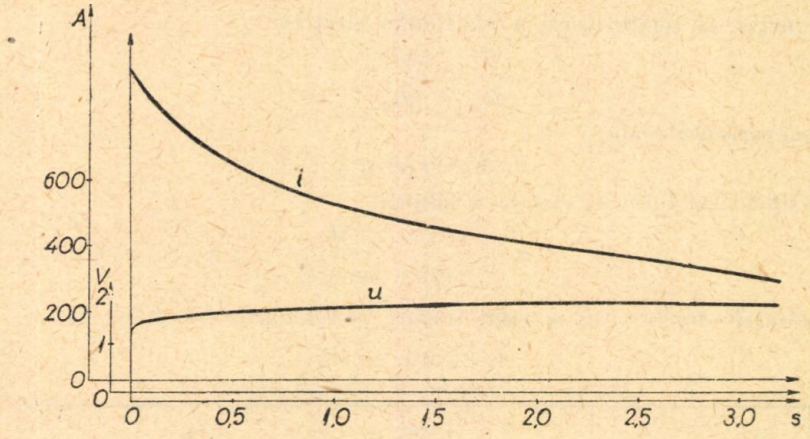

Fig. 19. — Oscilograma Nr. 10: Incălzirea la scurtcircuit a unui fir de aluminiu de 5 mm² (Eprubeta Nr. 12).

In figurile 19 și 20 sunt reprezentate ca exemplu oscilogramele Nr. 10 și 15 împreună cu scările ce au rezultat din măsurătorile de etalonare.

Eroarea de citire pe oscilograme nu a coborît sub 3% din cauză că liniile prea subțiri deveneau greu vizibile.

Din examinarea oscilogramelor se constată că intensitatea curentului scade exponențial, datorită parte creșterii rezistenței în circuit și parte scăderii forței

leectromotoare a sursei. Astfel, funcţia de timp a curentului se apropie mult de cea a curenţilor de scurtcircuit în reţele trifazice.

23. Calculul şi interpretarea rezultatelor

In cele ce urmează, din valorile măsurate se calculează mărimile caracteristice ale fenomenului de încălzire şi pe baza parametrilor cunoscuţi şi a teoriei se deduce comportarea conductorilor de aluminiu la scurtcircuite.

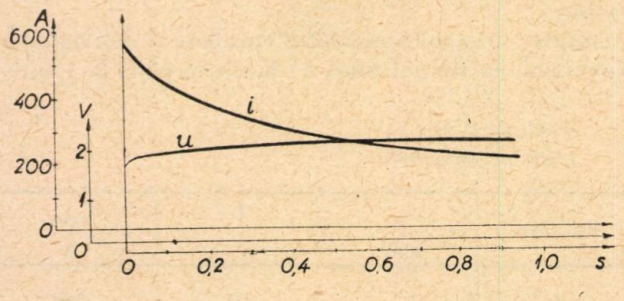

Fig. 20. — Oscilograma Nr. 15: Incălzirea la scurtcircuit a unui fir de aluminiu de 2,5 mm² (Eprubeta Nr. 11).

a) Calculul încălzirei staţionare are drept obiectiv stabilirea pierderilor termice staţionare şi a coeficientului total de cedare a căldurii.

Plecând dela valorile experimentale, consemnate în primele coloane ale tabloului Nr. 13, prin calcule elementare se poate stabili imediat

— puterea totală disipată

$$P = \Delta U \cdot I \quad W \tag{93}$$

— rezistenţa firului

$$R = \Delta U / I \quad \Omega \tag{94}$$

— funcţia de temperatură a rezistenţei electrice

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\Delta U}{I R_0} \tag{95}$$

— temperatura reală

$$\vartheta = f(R/R_0) \tag{96}$$

— coeficientul total de cedare a căldurii

$$\alpha = \frac{P}{\pi d l \vartheta} \quad \frac{W}{cm^2\,°C} \tag{97}$$

Rezultatele acestor calcule sunt trecute în tablourile Nr. 13 şi 15.

TABLOUL Nr. 15

Calculul experienţelor de încălzire staţionară

Nr. crt.	Epr. Nr.	d cm	l cm	$P/\pi dl$ W/cm²	R_0 Ω	R/R_0 —	ϑ °C	α mW/cm² °C
1				0,98		1,80	196	5,00
2	6	0,175	183	2,04	0,02025	2,79	415	4,92
3				3,22		4,32	660	4,82
4				0,612		1,63	150	4,07
5	7	0,250	240	0,700	0,01402	2,05	250	3,07
6				1,63		4,77	680	2,46

Drept valoare R_0 a fost considerată valoarea măsurată după experiențe, spre a include efectul oxidației.

La prima vedere rezultatele par a fi neconcordante. La firul de 2,5 mm² coeficientul de cedare este aproape constant, la cel de 5 mm² scade cu temperatura, după cum se vede din figura 21.

In ceea ce privește valoarea absolută a coeficientului de cedare, dintr'o comparație cu datele din figurile 2 și 11, se constată că ea este de aceeași ordine de mărime, însă mai mică decât valorile corespunzătoare firelor de același diametru întinse în aer liber. Firul mai gros disipa mai puțin decât cel subțire în aer liber. Ca termen de comparație a fost trecut în figura 21 coeficientul de cedare al firelor de același diametru, în aer.

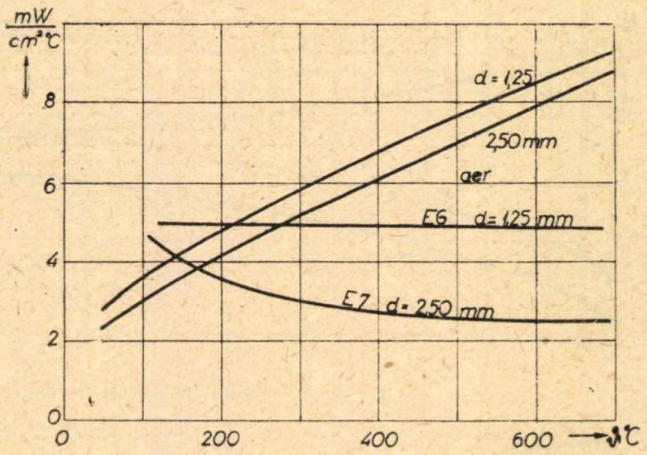

Fig. 21. — Cedarea staționară de căldură a eprubetelor.

Dat fiind că măsurătorile corespund unei realități, trebue să găsim interpretarea justă a fenomenului.

Inainte de toate trebue remarcat că firul înfășurat pe corpul refractar nu poate disipa la fel cu cel întins în aer liber, deoarece fenomenul convecției este diferit și către corpul refractar o mare parte a căldurii se cedează prin conductibilitate. Atâta timp cât corpul refractar este rece față de fir, este foarte probabil că firul să cedeze mai multă căldură decât în aer, care poate fi considerat un izolant termic bun. In starea staționară corpul se încălzește însă și el și schimbul de căldură prin conductibilitate devine mai redus. Pe când în aer liber temperatura mai ridicată a firului antrenează o mișcare mai violentă a aerului și mărește coeficientul de cedare, pe corpul refractar cu cât temperatura crește cu atât mai greu se face schimbul de căldură.

b) Calculul încălzirii la scurtcircuit are ca scop stabilirea exactă a curbelor reale de încălzire în funcție de sarcina termică, și a influențelor oxidației, a cedării de căldură și a recristalizării.

Plecând dela valorile experimentale înregistrate pe oscilograme se pot calcula aceleași mărimi ca în cazul încălzirii staționare. In plus, în acest caz interesează valorile sarcinii termice

$$G(t) = \int_0^t j^2 dt. \tag{98}$$

Avându-se în vedere că datele experimentale sunt disponibile sub formă de curbe continue în funcție de timp, se impune a se utiliza pentru toate calculele de mai sus, inclusiv integrarea, metoda grafică. In acest scop, după stabilirea scărilor respective, datele din oscilograme au fost trecute pe diagrame cu scară logaritmică în funcție de timp, care a rămas la o scară liniară. Operațiile de înmulțire și împărțire au fost efectuate prin simple adunări și scăderi ale ordonatelor diferitelor curbe în conformitate cu formulele (93)—(97).

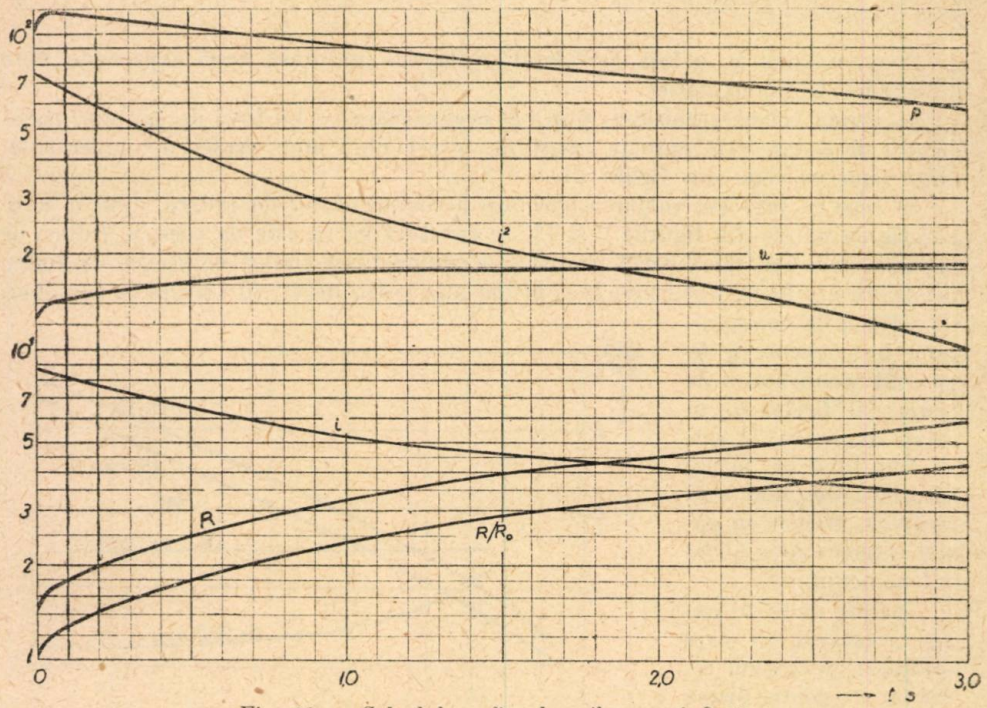

Fig. 22. — Calculul grafic al oscilogramei *O* 10.

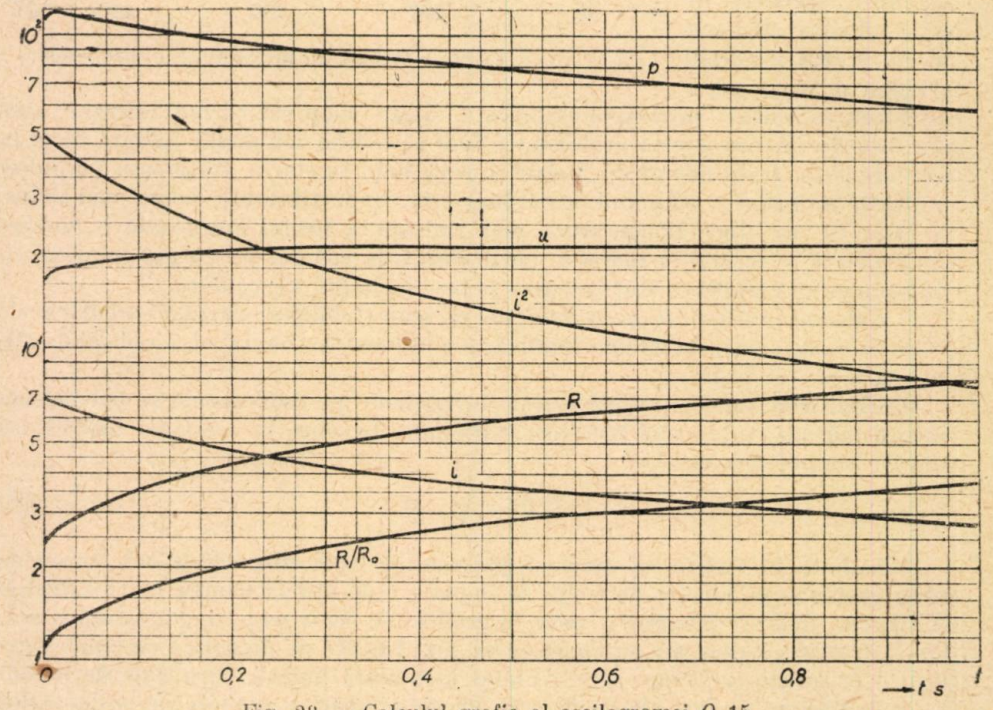

Fig. 23. — Calculul grafic al oscilogramei *O* 15.

Drept exemple pentru aceste operații se prezintă diagramele logaritmice (fig. 22 și 23), care se referă la oscilogramele *O* 10 și *O* 15.

Integrarea a fost făcută bineînțeles pe o hârtie milimetrică obișnuită, pe care au fost trecute valorile curbei pătratului densității în funcție de timp.

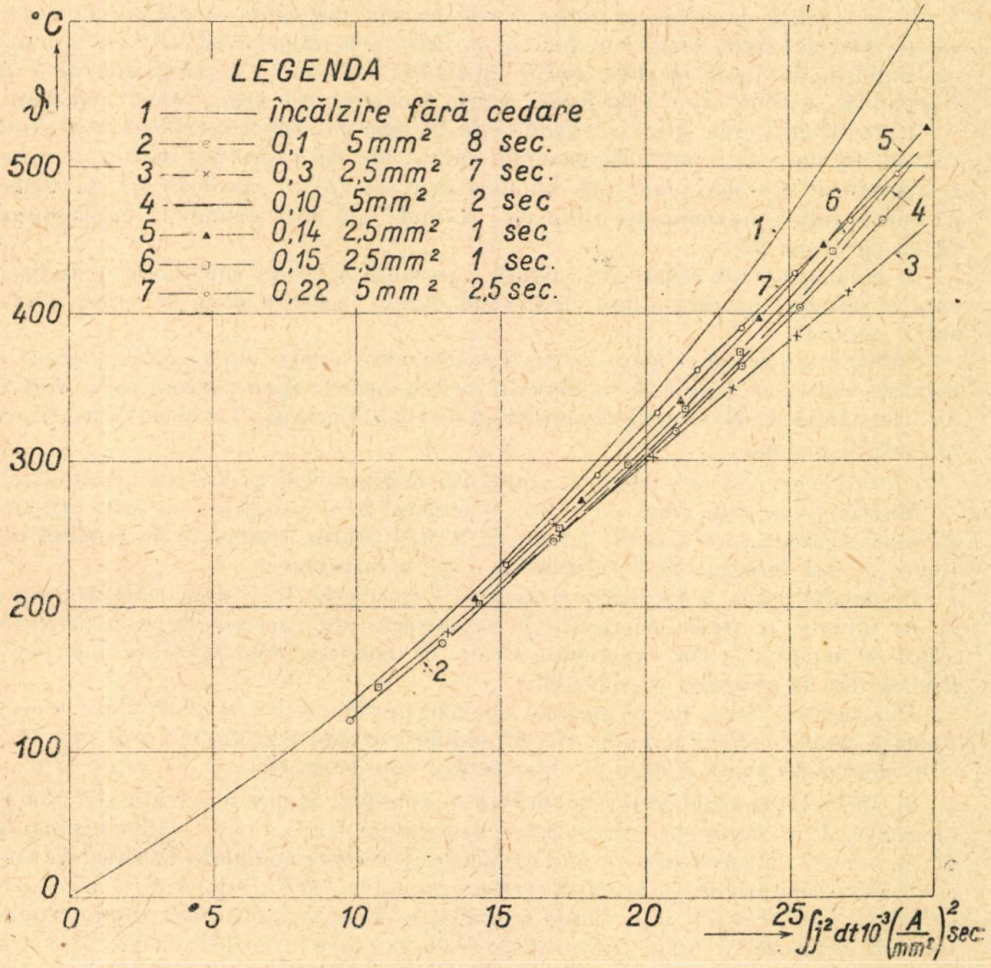

Fig. 24. — Comparația curbelor de încălzire ale eprubetelor.

Metoda grafică a avut avantajul că operațiile puteau fi extinse la un număr mare de puncte.

Din aceste calcule au fost construite pentru fiecare eprubetă curbele

$$\vartheta = f(G) \tag{99}$$

care, după ce au fost aduse la temperatura inițială de 0°C, au fost comparate cu curba teoretică a încălzirii fără cedare de căldură, cu luarea în considerare însă a variației tuturor parametrilor (fig. 15). Această comparație a fost făcută în figura 24 care poate fi considerată ca reprezentând rezultatele finale ale cercetării experimentale.

Curbele pot fi clasificate după cele două secţiuni de 2,5 şi 5 mm², examinate şi după durata încercării, care rezultă din tabloul Nr. 14.

Examinând cu atenţie diagrama din figura 24, se pot face următoarele constatări:

1. *In condiţii egale temperaturile rămân cu atât mai joase cu cât durata experienţei este mai mare.* Astfel, comparând curbele oscilogramelor *O*1, *O*10 (s=5 mm²) cu timpurile de 8 şi 2 secunde, sau *O*3 şi *O*14 (s= 2,5 mm²) cu timpurile de 7 şi 1 secundă, se vede clar că la durate scurte temperaturile ating valori mai mari.

2. *In condiţii egale firele cu secţiunea de* 2,5 *mm² dau temperaturi mai joase decât cele cu secţiunea de* 5 *mm².* De exemplu curba care dă la aceleaşi sarcini termice temperaturile cele mai joase este cea a oscilogramei *O*3 cu eprubeta E5, cu toate că durata totală a experienţei a fost de 7 secunde faţă de 8 secunde la oscilograma *O*1 cu eprubeta *E*3.

3. Incălzirea fără cedare de căldură reprezintă o limită superioară teoretică, care în practică nu este atinsă chiar când durata încălzirii până la topire scade sub 1 secundă.

Dificultatea cea mai mare în descoperirea altor relaţii din rezultatele experimentale constă în faptul că oxidarea şi recristalizarea apar concomitent, efectul lor însumându-se. Materialul experimental disponibil permite totuşi unele concluzii în această privinţă.

c) Influenţa oxidării reiese mai ales din măsurătorile la încălzire staţionară. Măsurându-se după cum s'a arătat la punctul 20 — rezistenţa electrică înainte şi după încălzire care a durat patru ore la temperaturi apropiate de punctul de topire, a fost înregistrată o creştere de 14% a rezistenţei.

Pe de altă parte, la încălzirea staţionară a eprubetei Nr. 6, care a durat numai 20 de minute, creşterea de rezistenţă la temperatura camerei după experienţă a fost de numai 4%. Din experienţe, rezultă că oxidarea progresează în timp dacă firul se află la temperaturi ridicate.

Din această cauză nu se greşeşte dacă se presupune că, la scurtcircuite care durează numai câteva secunde, efectul oxidării asupra rezistenţei scade sub 1% şi în consecinţă poate fi neglijat chiar pentru calcule exacte.

d) Influenţa recristalizării se manifestă concomitent asupra rezistenţei electrice şi mecanice. Prin recoacere rezistivitatea scade după V. V. U s o v [15] cu cel mult 4,1%, această valoare corespunzând tocmai recristalizării complete. Procesul de variaţie a rezistivităţii începe la 150°C şi este terminat la 350°C. După A. S. Z a i m o v s c h i şi V. V. U s o v [1], durata încălzirii neavând vreo influenţă asupra recristalizării, urmează că urma acestui efect trebue să apară în curbele de încălzire din figura 24. Intr'adevăr aceste curbe au tendinţa de a tinde spre temperaturi mai mari decât corespunde paralelismului cu curba teoretică, tocmai în intervalul de 150 şi 350°C. Această tendinţă este manifestată mai ales la curbele 3, 5 şi 7 din figura 23, care se referă la eprubete de 2,5 mm² secţiune. De fapt recristalizarea are ca efect trecerea de pe o curbă de încălzire pe alta adiacentă, corespunzând unei conductivităţi mai bune. Cum mărirea conductivităţii, adică scăderea rezistivităţii înseamnă mărirea integrandului în integrala de temperatură din expresia (76), curba de încălzire pentru materialul moale se află în condiţii egale deasupra curbei corespunzătoare materialului dur, şi anume având cu 3,4—4,1% valori mai mari de temperatură, corespunzând unei creşteri relativ proporţionale a conductivităţii.

e) Calculul coeficientului de cedare a căldurii este posibil invers din curba de încălzire reală şi cea teoretică fără cedare de căldură.

Pentru a ține seama de variația cu temperatura a parametrilor calculul se face pe diferențe finite de timp Δt. Pentru fiecare interval se citește din curba reală de încălzire valoarea temperaturii inițiale ϑ_r și creșterea sarcinii termice $\Delta j^2 t$. Cu noscând valorile corespunzătoare ale curbei fără cedare de căldură ϑ_t rezultă din ecuațiile (38) și (40),

$$\Delta\vartheta_r = \frac{j^2\rho}{\gamma c}\Delta t - \frac{\alpha}{\gamma c}\frac{4}{d}\vartheta\Delta t \tag{100}$$

$$\Delta\vartheta_t = \frac{j^2\rho}{\gamma c}\Delta t \tag{101}$$

Scăzând aceste ecuații rezultă

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_t - \Delta\vartheta_r = \vartheta_t - \vartheta_r = \frac{\alpha}{\gamma c}\frac{4}{d}\vartheta\Delta t \tag{102}$$

și în consecință

$$\alpha = \frac{\gamma c d\Delta\vartheta}{4\vartheta\Delta t}, \tag{103}$$

unde ϑ este temperatura medie în intervalul de timp considerat.

Ecuațiile (100) și (101) sunt interesante, deoarece termenii reprezintă temperaturi. Astfel poate fi definită contribuția la temperatură a sarcinii termice și cea a răcirii, care se scade în (100) din prima.

Aceste calcule au fost efectuate de coautor asupra valorilor oscilogramei *O1*, cu fir de 5 mm² secțiune. Intervalele s'au ales de 0,5 s. Au rezultat valori ale coeficientului de cedare care scădeau dela $\alpha = 14{,}8$ mW/cm²C° la $t = 1$ s, la $\alpha = 7{,}5$ mW/cm²°C, după $t = 5$s temperatura reală medie fiind respectiv de 55 și 455°C.

Cu toate că exemplul nu a fost fericit ales, deoarece chiar din figura 23 rezultă o deviație a curbei de încălzire 2 dela direcția fasciculului de curbă înspre sarcini termice mai mari, se constată totuși că valorile coeficientului α sunt mult mai mari decât cele din starea staționară; în plus ele descresc tinzând spre acele staționare.

Această comportare trebue să dea de gândit, deoarece este evident că valorile staționare ale cedării de căldură nu pot fi extinse numaidecât la stări tranzitorii. Dimpotrivă în aceste cazuri răcirea se face după legi încă foarte puțin cunoscute.

In cazul eprubetelor încercate este clar că, la începutul încălzirii corpul refractar rămânând rece, el absorbea o cantitate relativ mare de căldură și valoarea coeficientului este, în această fază, mare. Pe măsură ce părțile corpului refractar în contact cu firul s'au încălzit, cedarea prin conductibilitate este frânată și coeficientul de răcire tinde spre valoarea măsurată în stare staționară.

Este foarte probabil, că această comportare să se repete în principiu și la conductorii întinși în aer liber. Trebue deci ca în faza tranzitorie să se conteze pe un coeficient mult mai mare de cedare de căldură decât în faza staționară. Date cantitative asupra acestui fenomen nu pot fi însă stabilite decât pe cale experimentală. Dela început se poate afirma că astfel de experiențe sunt dificile, mai ales că nici teoria fenomenului nu este cunoscută.

24. Consecinţe asupra scăderii rezistenţei mecanice

Rezultatele experimentale permit o revizuire a sarcinilor admisibile de curenţi de scurtcircuit, care de obicei se dau fără a se ţine seama de variaţia parametrilor cu temperatura şi cedarea de căldură [13].

Plecând dela valorile din tabloul Nr. 4 şi figura 4 se poate constata că între pierderea procentuală a rezistenţei mecanice la încălziri de scurtă durată şi temperatura maximă există următoarea corespondenţă pentru aluminiu pur

0%	5%	20%	complet
130°	170°	210°	250°.

Cunoscând aceste limite, pe baza curbelor de încălzire se poate indica sarcina termică necesară pentru a aduce conductorul la temperaturile de mai sus. Rezultatele sunt trecute în tabloul Nr. 16, separat pentru fire sub şi peste 4 mm², înfăşurate în bobine, considerându-se o temperatură ambiantă de 20°C.

In acelaşi tablou s'au trecut şi valorile limită pentru fire întinse în aer liber, considerându-se că cedarea de căldură este conform valorilor din figura 16, mai mare la aceste fire.

TABLOUL Nr. 16

Sarcina de curent de scurtcircuit admisibilă pentru fire din aluminiu pur în 10^3 A^2 s/mm⁴

Natura conductorului	Pierderea de rezistenţă mecanică			
	0%	5%	20%	completă
Bobine cu 1 strat				
din fire: sub 4 mm²	8,2	10,8	12,9	14,9
din fire: peste 4 mm²	7,7	10,5	12,5	14,5
Fire în aer liber:				
sub 4 mm²	8,7	11,2	13,3	15,3
peste 4 mm²	8,3	10,8	12,9	14,9

Din valorile sarcinii de curent se pot deduce imediat densităţile de curent admisibile pentru scurtcircuite de diferite durate:

$$j = \sqrt{\frac{G}{t}} \quad \frac{A}{mm^2}$$

Astfel pentru fire sau conductori cu secţiuni mai mari decât 4 mm² şi durata de scurtcircuit de trei secunde, rezultă valorile din tabloul Nr. 17, în care s'au introdus spre comparaţie limite indicate în literatura de specialitate [13].

TABLOUL Nr. 17

Densitatea de scurtcircuit admisibilă a conductorilor de aluminiu pur în A/mm² ($t = 3$ *s*)

Natura conductorului	Pierderea de rezistenţă mecanică			
	0%	5%	20%	completă
Bobine cu 1 strat	50,7	59,6	64,5	69,5
Fire în aer liber	52,5	60,0	65,5	70,5
Idem date din [13]	51,0	59,0	64,5	69

Din comparația ultimelor două rânduri din tabloul Nr. 17 rezultă că după cercetările noastre limitele stabilite pentru densități de scurtcircuit pot fi cu 1,7—2% mai mari decât cele indicate până în prezent în literatură.

TABLOUL Nr. 18

Densități de scurtcircuit admisibile a conductorilor electrici în A/mm² ($t = 3$s)

Nr. crt.	Materiale	Pierderea de rezistență mecanică			
		0%	5%	20%	completă
1	Cupru	87,5	98,5	104	109
2	Aluminiu	52,5	60	65,6	70,5
3	Aldrey	52,5	57	63	85
4	Oțel-Aluminiu 1:6.....	54,5	62,2	71	73,5
5	Oțel-Aluminiu 1:4.....	54	66,5	74	74
6	Oțel-Aluminiu 1:3	55,5	71	—	73,5

Extrapolând aceste rezultate asupra aliajelor de Al și a conductorilor de OL — Al rezultă densitatea de curent de scurtcircuit admisibilă din tabloul Nr. 18 (în locul tabloului III, p. 243 în [13]).

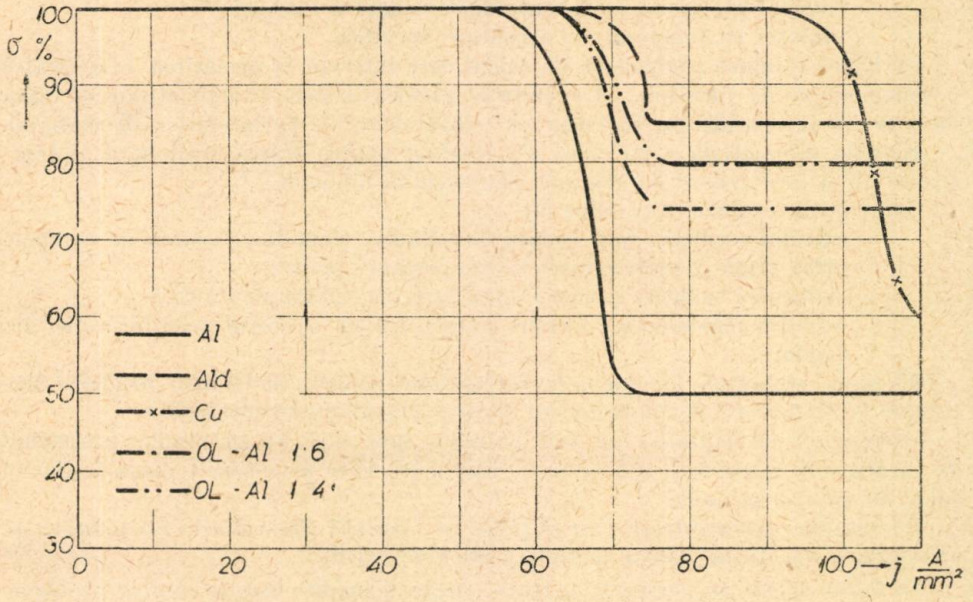

Fig. 25. — Rezistența procentuală a conductorilor în funcție de densitatea de curent de scurtcircuit ($t = 3$, $\vartheta_0 = 20$°C).

La funii de oțel-aluminiu densitățile se referă numai la secțiunea de aluminiu. Valorile care corespund unei pierderi complete de rezistență sunt minime, la depășirea cărora pierderea nu mai crește.

Spre a permite citirea de valori intermediare între cifrele indicate în tabloul Nr. 18, în figura 25 s'au trecut valorile relative ale rezistenței mecanice în funcție de densitatea de curent de scurtcircuit pentru o durată de 3 s și o temperatură ambiantă de + 20°C.

Prin aceste tablouri și diagrame s'a completat materialul documentar ce se pune la dispoziția proiectanților de linii și instalații electrice în care se utilizează conductori de aluminiu.

E. ÎNCHEIERE

25. Concluzii

a) Avându-se în vedere tendințele de a susține introducerea aluminiului pe o scară largă în rețelele și instalațiile electrice și dispunând de rezultatele unor cercetări experimentale, s'a întreprins un studiu al încălzirii la scurtcircuit a conductorilor de aluminiu.

b) Fenomenul fizic al încălzirii staționare și tranzitorii a conductorilor sub sarcini de curent s'a prezentat și analizat în detaliu.

Contribuții originale s'au adus la:

— calculul suprafeței de radiație a funiilor normale pentru linii aeriene;

— valorile exacte ale variației cu temperatura a rezistivității până la punctul de topire;

— evaluarea influenței oxidației superficiale asupra rezistenței electrice a firului;

— calculul practic al coeficientului de cedare a căldurii;

— variația cu temperatura a căldurii specifice.

c) S'au examinat problemele de calcul care intervin la urmărirea matematică a fenomenului de încălzire, atrăgându-se atenția asupra complicațiilor ce apar dacă se iau în considerare variațiile cu temperatura ale parametrilor de material.

Ecuația diferențială a încălzirii s'a rezolvat pentru starea staționară și tranzitorie cu și fără cedare de căldură către mediul ambiant.

Contribuții originale s'au adus la:

— calculul încălzirii fără cedare de căldură, ținându-se seama de comportarea reală a materialului la temperaturi înalte;

— deducerea soluției ecuației încălzirei cu cedare de căldură;

— calculul fenomenului termic tranzitoriu cu ajutorul transformației lui Laplace.

d) S'au prezentat experiențele întreprinse pentru cercetarea încălzirii staționare și tranzitorii a conductorilor masivi din aluminiu electrolitic.

Inregistrări oscilografice au fost necesare spre a se putea urmări fenomenul de încălzire la intensități din ce în ce mai mari, care provocau topirea firului în timp de câteva secunde.

Rezultatele experiențelor s'au obținut cu ușurință din valorile înregistrate pe oscilograme cu ajutorul unor metode grafice de calcul.

e) Experiențele au permis a se trage concluzii inedite asupra multor probleme încă nelămurite în legătură cu încălzirea la scurtcircuit. Astfel s'a constatat că:

— cedarea de căldură influențează fenomenul și sub durate de 1s a scurtcircuitului;

— firele cu diametri mai reduși, disipând mai ușor căldura, se încălzesc mai puțin decât conductorii cu secțiuni mai mari;

— influența oxidării superficiale se poate neglija la încălziri de scurtcircuit, nu însă și la cele staționare cât și la temperaturi ridicate;

— recristalizarea materialului influențează forma curbei de încălzire între 150 și 350°C, ridicându-o cu 3—4%;

— coeficientul de cedare a căldurii este mai mare în faza tranzitorie decât în cea staționară. El scade cu timpul spre valoarea staționară. Acest fenomen merită a fi cercetat experimental;

— din curbele de încălzire calculate rezultă că valorile admisibile ale densității de curent de scurtcircuit, indicate în literatura de specialitate pentru conductorii de aluminiu, trefilați la rece, sunt cu aproximativ 2% prea mici. S'au dat valorile exacte ale densității de curent de scurtcircuit, care provoacă anumite scăderi procentuale ale rezistenței mecanice a conductorilor din aluminiu trefilat;

— la conductorii liniari din aluminiu moale (recopt), efectul recristalizării ne mai existând, se pot admite densități de curent de scurtcircuit cu 5—6% mai mari decât cele indicate până în prezent în literatura de specialitate.

f) Diferențele față de datele cunoscute care au rezultat din prezenta lucrare nu sunt mari, dar este important că ele s'au stabilit luând în considerare toate fenomenele anexe ce pot influența încălzirea conductorilor. Rezultă, în definitiv, că valorile cunoscute nu sunt într'atât de acoperitoare, cât se afirmă fără a se cunoaște în detaliu toate influențele.

g) In lucrare s'au dat numeroase date fizice și tehnice privind comportarea aluminiului, spre a servi proiectanților instalațiilor în care acest material prețios pentru electricieni urmează a se întrebuința.

НАГРЕВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Явление транзитивного нагрева алюминиевых проводников не разъяснено во всех его деталях. В частности неизвестно влияние теплоотдачи для промежутка времени в 2—3 секунды, пока длится короткое замыкание, влияние окисления, а также влияние структурных изменений, появляющихся при температурах, превышающих 150°.

На основании известных исследований были рассмотрены и изложены геометрические и физические задачи в связи с охлаждением и нагревом массивных алюминиевых проводников, а также алюминиевых тросов. Авторы внесли новый вклад в вопрос полезной поверхности излучения, а также изменения параметров в зависимости от температуры.

Физические явления были упрощены и сформулированы математически с помощью дифференциальных уравнений, причем был вычислен транзитивный нагрев с учетом изменения параметров в зависимости от температуры и теплоотдачи. Транзитивные фазы были вычислены с помощью лапласовых преобразований.

Для уточнения физической и математической теории явления были произведены лабораторные испытания для выяснения действительного поведения алюминиевых проводников при коротком замыкании.

Проводники из электролитического алюминия были подвержены импульсам постоянного тока с начальной силой до 1000 А. Регистрация полученных величин была произведена с помощью магнитоэлектрического осциллографа. Были сделаны интересные выводы относительно

влияния теплоотдачи, структурных изменений, а также окисления во время импульсов. Указанные в литературе допустимые значения для силы тока были исправлены в зависимости от полученных результатов. Полученные разницы незначительны, однако это является следствием противоречивых влияний различных частичных факторов. В таблицах и диаграммах, приложенных к труду, авторы приводят большое количество физических и технических величин и данных, облегчающих рассмотрение теоретических соображений, а также применение их на практике.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Изменение сопротивления прохождению электрического тока у электролитического алюминия в зависимости от температуры.

Рис. 2. — Отдача тепла у проводов через излучение и воздушные течения; $f(v)$ — отдача тепла в зависимости от скорости воздуха.

Рис. 3. — Изменение удельной теплоемкости алюминия в зависимости от температуры.

Рис. 4. — Уменьшение механического сопротивления у проводящих металлов в зависимости от температуры.

Рис. 5. — Влияние нормального нагрева при температуре в 77° на механическую сопротивляемость проводников.

Рис. 6. — Влияние кратковременного нагрева с помощью сверхнапряжений на разрыв алюминиевых проводов.

Рис. 7. — Нормальная нагрузка функций алюминия для случая различных сверхтемператур.

Рис. 8. — Допустимая нагрузка воздушных проводов на солнце при ветре скоростью 1,5 км/час.

Рис. 9. — Эквивалентное тепловое сопротивление на отдачу тепла горизонтальных воздушных проводов.

Рис. 10. — Изменение характерных параметров у алюминия и меди в зависимости от температуры.

Рис. 11. — Изменение полного коэффициента тепловой отдачи в зависимости от температуры.

Рис. 12. — Температурная функция обратного выражения постоянной времени охлаждения.

Рис. 13. — Стационарная температура алюминиевых проводов, имеющих постоянные (Θ) и переменные (Θ_3) параметры.

Рис. 14. — Сравнение методов вычисления стационарных температур.

Рис. 15. — Изменение величины $\gamma c\rho/\psi c\rho$ в зависимости от температуры.

Рис. 16. — Нагрев алюминия, латуни и меди без теплоотдачи.

Рис. 17. — Пробирка. Алюминиевая проволока 5 мм² на огнеупорном цилиндрическом теле типа *B*.

Рис. 18. — Электрическая схема измерительного прибора.

Рис. 19. — Осциллограмма № 10. Нагрев при коротком замыкании алюминиевой нити 5 мм (пробирка № 12).

Рис. 20. — Осциллограмма № 15. Нагрев при коротком замыкании алюминиевой нити 2,5 мм (пробирка № 11).

Рис. 21. — Стационарная отдача тепла пробирками.

Рис. 22. — Графический расчет осциллограммы 0,10.

Рис. 23. — Графический расчет осциллограммы 0,15.

Рис. 24. — Сравнение кривых нагрева пробирок.

Рис. 25. — Относительное сопротивление проводников в зависимости от плотности тока короткого замыкания ($t = 3^s$, $\vartheta_0 = 20^\circ$).

L'ÉCHAUFFEMENT DES CONDUCTEURS D'ALUMINIUM PAR COURT-CIRCUIT

(RÉSUMÉ)

Le phénomène de l'échauffement transitoire des conducteurs d'aluminium n'est pas élucidé dans tous ses détails. On ne connaît pas, de fait, l'influence de la dissipation de la chaleur pour des durées de 2—3 secondes — durée des court-circuits — ni l'influence de l'oxydation, ni celle des modifications structurales apparaissant à des températures supérieures à 150°C.

Prenant pour point de départ des recherches connues, on a étudié et exposé les problèmes géométriques et physiques relatifs au refroidissement échauffement des conducteurs massifs et câbles en aluminium. On a apporté de nouvelles contributions au sujet de la surface de radiation efficace, de la variation des paramètres avec la température.

On a simplifié, les phénomènes physiques et on les a mis sous une formule mathématique à l'aide de certaines équations différentielles et l'on a calculé l'échauffement transitoire, en tenant compte de la variation des paramètres avec la température et la dissipation de chaleur. Les phases transitoires ont été calculées à l'aide de la transformation de Laplace.

Afin de préciser la théorie physique et mathématique du phénomène, on a effectué des expériences de laboratoire, destinées à clarifier le comportement réel des conducteurs d'aluminium pour les courts-circuits.

Les conducteurs en aluminium électrolytiques ont été soumis à certaines impulsions de courant continu, dont les intensités initiales allaient jusqu'à 1000 A. On a enregistre la variation des valeurs à l'aide de l'oscillographe à boucles. On a tiré d'intéressantes conclusions au sujet de l'influence de la dissipation de la chaleur, des changements de structure et de l'oxydation au cours des impulsions. Les valeurs des intensités admissibles, indiquées en littérature, ont été corrigées en fonction des résultats des recherches. Les différences ne sont pas grandes, mais cela est dû à l'influence antagoniste des différents phénomènes partiels. Les tableaux annexes et les diagrammes présentent de nombreuses valeurs et données qui permettent de poursuivre aisément les considérations théoriques ainsi que leur application pratique.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — La variation de la résistance électrique avec la température de l'aluminium électrolytique.

Fig. 2. — Dissipation de la chaleur des fils, par radiation et par convection $f(v)$: dissipation de chaleur en fonction de la vitesse de l'air.

Fig. 3. — La variation de la chaleur spécifique de l'aluminium avec la température.

Fig. 4. — Diminution de la résistance mécanique des métaux conducteurs avec la température.

Fig. 5. — L'influence de l'échauffement de régime à 77°C sur la résistance mécanique des conducteurs.

Fig. 6. — Résistance à la rupture des conducteurs d'aluminium lors d'échauffements brefs par surintensités.

Fig. 7. — La charge de régime des conducteurs d'aluminium pour différentes surtempératures.

Fig. 8. — La charge admissible des conducteurs aériens au soleil et pour un vent de 1,5 km/h.

Fig. 9 . — La résitance thermique équivalente pour la dissipation de la chaleur des conducteurs horizontaux en l'air.

Fig. 10. — La variation avec la température des paramètres caractéristiques de l'aluminium et du cuivre.
Fig. 11. — La variation avec la température du coefficient total de dissipation de la chaleur.
Fig. 12. — La fonction de température de l'inverse de la constante de temps du refroidissement.
Fig. 13. — La température stationnaire des conducteurs d'aluminium aux paramètres constants (Θ) et variables (Θ_3).
Fig. 14. — Comparaison des méthodes de calcul de la température stationnaire.
Fig. 15. — La variation de la grandeur $\rho/\psi c/\rho$ avec la température.
Fig. 16. — L'échauffement sans dissipation de chaleur, aluminium, laiton et cuivre.
Fig. 17. — Eprouvette. Fil d'Al 5 mm² sur un corps cylindrique refractaire de type B.
Fig. 18. — Schéma électrique du dispositif de mesure.
Fig. 19. — Oscillogramme no 10: l'échauffement au court-circuit d'un fil d'aluminium de 5 mm² (éprouvette no 12).
Fig. 20. — Oscillogramme no 15: l'échauffement au court-circuit d'un fil d'aluminium de 2,5 mm² (éprouvette no 11).
Fig. 21. — La dissipation stationnaire de chaleur des eprouvettes.
Fig. 22. — Le calcul graphique de l'oscillogramme O.10.
Fig. 23. — Le calcul graphique de l'oscillogramme O.15.
Fig. 24. — Comparaison des courbes d'échauffement des éprouvettes.
Fig. 25. — La résistance relative des conducteurs en fonction de la densité de courant de court-circuit ($t = 3$ s $\vartheta_0 = 20$°C).

BIBLIOGRAFIE

1. A. S. Zaimovschi i V. V. Usov, *Metali i splavî v electrotehnike.* Gosenergoizdat. Moscova-Leningrad, 1949.
2. L. Binder, *Über Wärmeübergang auf ruhige und bewegte Luft.* Diss. T. H., München, 1911.
3. M. A. Miheev, *Osnovi teploperedacii.* G.E.I., Moscova-Leningrad, 1947.
4. A. Avramescu, Z. techn. Phys., 1939, v. 20, p. 26—30.
5. M. Kornfeld, Vestnik Electropromişlennosti, 1931, Nr. 5—6, p. 10.
6. M. ten Bosch, *Der Wärmeübergang.* Springer, Berlin, 1936.
7. L. S. Eigenson, *Modelirovanie.* Sovetskaia Nauka, Moscova, 1952.
8. Schwining u. Ströbel, Z. f. Metallk., 1932 Nr, 7, p. 251.
9. A. Avramescu, Z. techn. Physik, 1939, t. 20, Nr. 7, p. 23.
10. C. Taylor, L. Willy, D. Smith, I. Edwards, Met. a. All., 1938, v. 9, p. 238.
11. A. A. Glazunov i I. V. Butkin *Electriceskaia ceast stanţii i podstanţii.* Gosenergoizdat, Moscova-Leningrad, 1950.
12. Aluminium-Taschenbuch, Al. Zentrale, Berlin, 1941.
13. I. P. Behrens, L. Lux u. I. Nefsger, Aluminium-Freileitungen, Al. Zentrale, Berlin, 1940.
14. A. Sukin, Electrotehniki Jurn., 1931, Nr. 7, p. 6.
15. V. V. Usov, Elektricestvo, 1932, Nr. 14, p. 8.
16. H. Schmitt, E. T. Z., 1928, v. 49, Nr. 18, p. 684—688.
17. A. Avramescu, *Beiträge zur Erwärmungsberechnung elektrischer Leiter.* Habil. Diss. T. H., Dresden, 1943.
18. H. Dedun, Rev. Gén. Electr., 1949, t. 58, Nr. 11, p. 478—481.
19. P. Chapulie, Rev. Gén. Electr., 1950, t. 59, p. 114—116.
20. F. Moeller, Arch. f. Elektrotechn., 1949, t. 39, p. 429—442.
21. S. A. Ulianov, *Korotkie zamîkania v elektriceskih sistemah*, G.E.I., Moscova, 1952.
22. A. Avramescu, *Beiträge zur Berechung der Kurzschlusserwärmung.* Diss. T. H., Dresden, 1937.
23. — E.T.Z., 1938, t. 59, Nr. 37, p. 985.
24. — Arch. Electrotechn., 1941, t. 35, p. 344—352.
25. J. Wrana, Arch. Elektrotechn., 1939, t. 33, Nr. 10, p. 655—672.
26. A. I. Builov, *Osnovi elektroaparatostroenie.* G. E. I., Moscova-Leningrad, 1947.
27. I. M. Rîjic i T. S. Grodştein, *Tabliţi integralov, sum, riadov i proizvedenii.* Gostehizdat, Moscova-Leningrad, 1951.
28. A. Avramescu, E.T.Z. 1941, t. 62, p. 591—594.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ELECTROENERGETICĂ

METODA PENTRU LOCALIZAREA RAPIDĂ A DEFECTELOR DE IMPEDANŢĂ DIN LINIILE DE TELECOMUNICAŢII

DE

P. POSTELNICU

Introducere. Un circuit omogen sau pupinizat, terminat la un capăt cu impedanţa sa caracteristică, prezintă în mod teoretic la celălalt capăt impendanţa la intrare egală cu impedanţa caracteristică.

In practică, atât circuitele omogene cât şi cele pupinizate prezintă mici neregularităţi chiar la construcţia cea mai îngrijită. La circuitele pupinizate, în cablu, aceste neregularităţi provin din diferenţa de capacitate dintre diferitele lungimi de fabricaţie ale cablului, din diferenţa de lungime a câmpurilor de încărcare şi, de asemenea, din diferenţa inductanţei bobinelor de încărcare. Aceste neregularităţi formează puncte de reflexie ale undelor transmise şi, din această cauză, curba impedanţei caracteristice măsurată prezintă uşoare ondulaţii.

Mărimea relativă a ondulaţiilor impedanţei poate fi exprimată şi de cantitatea

$$A = 20 \lg \frac{Z_1 + Z}{Z_1 - Z} db \tag{1}$$

$$A = \ln \frac{Z_1 + Z}{Z_1 - Z} N \tag{2}$$

numită atenuarea de echilibrare sau regularitate, în care Z_1 este valoarea impedanţei măsurate şi Z valoarea medie a acesteia (fără ondulaţii).

In cazul că impedanţa la intrare, măsurată ca mai sus (circuitul terminat cu impendanţa caracteristică), prezintă oscilaţii anormal de mari, se spune că avem un defect de impedanţă.

Cauzele care provoacă în general aceste oscilaţii sunt: rezistenţele locale (sudurile proaste), o bobină de încărcare cu inductanţă diferită de cea normală, un defect de izolament pronunţat, un scurtcircuit între fire, neomogenitatea perechii de fire. In cazul când circuitul este format din mai multe secţiuni de impedanţe caracteristice diferite, o proastă adaptare între aceste secţiuni provoacă de asemenea ondulaţii pe curba impedanţei la intrare.

1. Ondulaţiile impedanţei la intrare sunt cauzate de reflexia în punctul defect. Aplicând o tensiune sinusoidală la capătul A al circuitului, presupus închis la celălalt capăt B cu impedanţa sa caracteristică, curentul pe circuit în punctul A va fi format din componenta directă şi cea reflectată.

Diferența de fază a acestor două componente crește cu frecvența și rezultanta lor, curentul în punctul A va prezenta oscilații în jurul unei valori medii, cu maxime la frecvențele la care cele două componente sunt în fază și minime când cele două componente sunt în opoziție de fază. Impedanța la intrare va prezenta de asemenea oscilații în jurul valorii medii, cu maxime la frecvențele la care curentul prezintă minime (fig. 1).

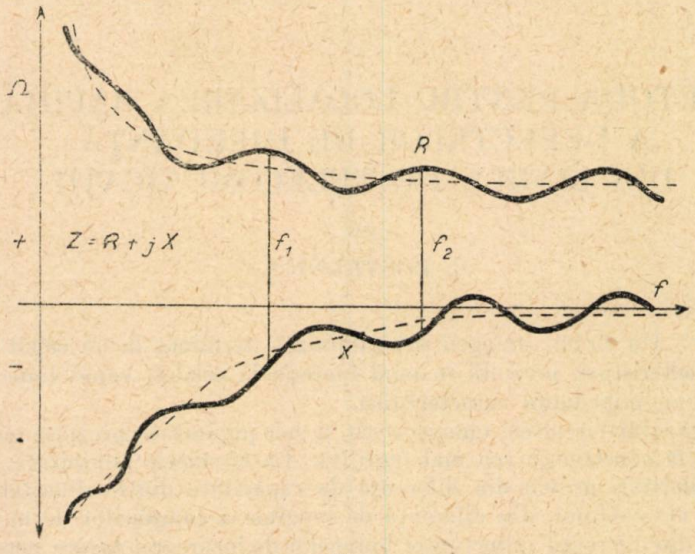

Fig. 1

La un circuit omogen, defazarea curentului pe unitatea de lungime fiind β, vom avea în punctul A o diferență de fază între curentul direct și cel reflectat în punctul P, la distanța x de A, $b = 2\,xp + \delta$, unde δ este defazarea curentului în punctul de reflexie, pe care o considerăm constantă în domeniul de frecvențe utilizat de măsurătoare.

In cazul că la frecvența f_1, impendanța prezintă un maxim, la această frecvență defazarea are valoarea

$b_1 = 2\,x\beta_1 + \delta = (2k + 1)\,\pi$ (cei doi curenți sunt în opoziție de fază).

Mărind frecvența, β va crește și vom avea maximum următor la frecvența la care este satisfăcută condiția

$$b_2 = 2x\,\beta_2 + \delta = (2k + 3)\,\pi.$$

Din cele de mai sus deducem

$$b_2 - b_1 = 2x\,(\beta_2 - \beta_1) = 2\,\pi$$

sau

$$x = \frac{\pi}{\beta_2 - \beta_1}, \tag{3}$$

unde β_1 și β_2 corespund la două maxime succesive sau la două puncte oarecare de pe curba impedanței, care limitează o perioadă a ondulațiilor acesteia.

In cazul că β_1 și β_2 corespund la două frecvențe, între care avem m perioade ale acestor ondulații, vom avea

$$x = \frac{m\pi}{\beta_2 - \beta_1}. \tag{3'}$$

Relațiile (3) sau (3') sunt folosite pentru localizarea defectelor de impedanță cu ajutorul curbei impedanței la intrare măsurată. Metoda necesită deci măsurarea impedanței la intrare a circuitului închis la extremitatea opusă cu impedanța sa caracteristică, într'o bandă de frecvențe, în care impedanța să conțină mai multe puncte de maximum.

Se trasează curba impedanței în funcție de frecvență, ca în figurile 1 sau 2. Valorile β_1 și β_2 ale constantei de fază la frecvențele f_1 și f_2 fie că se iau din tabele sau diagrame, fie că se calculează cu ajutorul formulei

$$th\,(\alpha + \gamma\beta) = \sqrt{Z_s/Z_i},$$

unde Z_s și Z_i sunt impedanțele la intrare în scurt și în gol ale circuitului fără defect (sau ale unui circuit identic cu cel defect).

Presupunând că în intervalul de frecvență $f_1 - f_2$ avem

$$\frac{\omega}{\beta} = v = Ct$$

punând

$$\beta_1 = \omega_1/v = 2\pi f_1/v \quad \text{și} \quad \beta_2 = \omega^2/v = 2\pi f_2/v,$$

formula (3') devine

$$x = \frac{mv}{2(f_2 f_1)} \tag{4}$$

unde v este viteza de propagare în intervalul $f_1 - f_2$.

Viteza de propagare v se ia din tabele sau, în cazul lipsei acestora, se determină prin măsurători. In locul metodei de mai sus (pentru măsura lui v), putem folosi următorul procedeu mai simplu: se crează în mod artificial un punct de reflexie pe un circuit bun, identic cu cel defect (se leagă, de exemplu, în scurt extremitatea opusă a circuitului) și se măsoară impedanța la intrare. Două maxime succesive ale acestei impedanțe (la frecvențele f_1 și f_2) ne dau viteza de propagare

$$v = 2(f_2 - f_1)\, l,$$

unde l este lungimea circuitului.

In cazul circuitelor pupinizate, defazarea undei de curent sau tensiune nu mai este constantă de a lungul circuitului (prezintă salturi în dreptul bobinelor de încărcare) și nu mai putem aplica formulele de mai sus pentru determinarea locului defect. In acest caz, în loc de β, ne vom folosi de constanta de defazare pe un câmp de încărcare b. Formula (3') devine în acest caz

$$n = \frac{m}{b_2 - b_1}, \tag{5}$$

unde n este numărul de câmpuri de încărcare până la punctul defect. Formula (5) ne indică deci câmpul de încărcare în care se află defectul, nu și distanța exactă; de exemplu, dacă $n = 23{,}3$, defectul se află în câmpul nr. 24.

In cazul când este nevoie, pentru determinarea exactă a locului deranjamentului, se poate face o măsurătoare locală pe porțiunea de circuit corespunzătoare câmpului de încărcare în care se găsește defectul.

In cazul că nu avem tabele cu valorile constantei b, putem determina această constantă prin măsurători ca și în cazul circuitelor omogene sau prin calcul cu ajutorul formulei aproximative

$$b = 2 \text{ arc sin} \frac{f_1}{f_0}, \tag{6}$$

care asimilează un câmp de încărcare cu un filtru «trece în jos» fără pierderi și în care f_0 este frecvența de tăiere, care se poate determina din măsura impedanței la intrare a circuitului închis cu impedanța caracteristică.

Eroarea metodei. Notând cu F perioada oscilațiilor curbei de impedanță, adică

$$F = f_2 - f_1,$$

relația (4) devine

$$x = \frac{v}{2F}. \tag{4'}$$

Exactitatea rezultatului dat de formula (4) sau (5) depinde de exactitatea cu care se poate aprecia pe curbă perioada F, și de exactitatea valorii lui v folosită. In mod obișnuit, la aprecierea perioadei F se fac erori care rezultă din măsurarea impedanței Z, din aprecierea frecvențelor f_1 și f_2, care delimitează una sau mai multe perioade F (de erori la aprecierea punctelor de maxim) și din erorile de frecvență ale oscilatorului utilizat.

Valoarea vitezei de propagare v se ia din tabelă sau se determină prin măsurători.

In ipoteza că erorile relative sunt mici, adică

$$\frac{\Delta v}{v} \ll 1 \text{ și } \frac{\Delta F}{F} \ll 1,$$

eroarea maximă asupra lui x este dată de relația

$$\Delta x = x \frac{\Delta v}{v} + x \frac{\Delta F}{F}, \tag{7}$$

în care s'a considerat valoarea absolută a erorilor.

Presupunând că x variază, Δv rămâne constant, fiind independent de x, însă ΔF scade puțin odată cu creșterea lui x, deoarece și F scade. Ținând seama de cauzele de erori asupra lui F, arătate mai sus, putem presupune că variația lui ΔF cu x este dată aproximativ de o relație de forma

$$\Delta F = \frac{k}{x^r},$$

unde $0 < r < 1$ și k sunt constante.

Practic se poate lua $r \simeq 1$.

Din relația (7), în ipoteza $r \simeq 1$, rezultă, ținând seama de (4')

$$\frac{\Delta F}{F} \simeq \frac{2k}{v} = \delta_F$$

(δ_F independent de x).

Notând

$$\frac{\Delta v}{v} = \delta_v ,$$

relația (7) se poate scrie sub forma

$$\Delta x \simeq x\,(\delta_v + \delta_F) \text{ sau } \frac{\Delta x}{x} \simeq \delta_v + \delta_F = \delta_x . \tag{8}$$

Relația (8) exprimă rezultatul important că eroarea relativă asupra lui x este aproximativ independentă de x.

Relația aceasta explică faptul că localizarea unui deranjament, în cazul când acesta se găsește la o distanță mare x față de locul de măsurătoare, nu se poate face practic cu suficientă precizie. Astfel, de exemplu, în cazul când x are valoare de 30—40 km, eroarea asupra distanței x este mai mare de 2 km, chiar la o măsurătoare îngrijită cu aparatele obișnuite pentru acest gen de măsurători.

De aceea, pentru a găsi locul deranjamentului, se procedează practic în modul următor: se taie cablul la joncțiunea cea mai apropiată de punctul P, situat la distanța x, rezultată din măsurători, se izolează (se întrerupe) perechea defectă și apoi, capetele dinspre masa de măsurat se închid cu un dipol a cărui impedanță este egală cu impedanța caracteristică a circuitului. Se măsoară din nou impedanța la intrare și în cazul că prezintă din nou neregularități, rezultă că punctul defect se află la o distanță mai mică decât x. In felul acesta, prin încercări ne apropiem de locul defect. In cazul circuitelor încărcate trebue să tăiem cablul în punctul situat la jumătatea unui câmp de încărcare și care să fie cel mai apropiat de x sau, dacă întrerupem circuitul într'un punct oarecare, trebue să-i conectăm o terminație corespunzătoare.

Din cauza lipsei de precizie, metoda aceasta implică deci o serie de tatonări. Localizarea defectului cere timp, este costisitoare și prin tăierea cablului se aduce acestuia prejudicii mecanice și electrice.

Pentru a remedia incovenientul lipsei de precizie, o primă metodă ar fi următoarea:

După ce am terminat prin măsurători dela un capăt al circuitului distanța aproximativă x până la locul defect, ne deplasăm cu aparatele de măsură în punctul situat la distanța x. Se desface (taie) cablul la joncțiunea cea mai apropiată de x și se măsoară din acest punct impedanța circuitului, de exemplu spre capătul din stânga. In caz că se constată că defectul nu este în această porțiune (impedanța nu are neregularități), se măsoară impedanța celeilalte porțiuni de circuit. Cu datele furnizate de curba impedanței se calculează distanța până la locul defect. De data aceasta, măsurătoarea fiind făcută în apropierea punctului defect, eroarea ce se face la calcularea distanței până la locul defect este mai mică.

Metoda aceasta de lucru are marele incovenient că necesită mijloace de transport și aparate de măsură alimentate cu baterii. De asemenea, timpul necesar găsirii deranjamentului este mare și lucrările sunt constisitoare.

2. O a doua soluție, mai economică și mai expeditivă, propusă de noi, este următoarea:

Se determină cu metoda dela punctul 1, prin măsurarea impedanței circuitului din capătul A al acesteia, distanța aproximativă x până la locul deranjamentului, presupus situat în punctul P_1, la distanța exactă x_1. Se taie cablul la joncțiunea cea mai apropiată de punctul x (în punctul P) unde se închide perechea defectă cu o rezistență a cărei valoare diferă cu 50%—100% de modulul impedanței caracteristice.

In ipoteza că $x_1 < x$, vom avea pe circuitul $A-P$ două puncte de reflexii, anume în punctul defect P_1 și în punctul terminal P.

In caz că $x_1 > x$, va trebui să facem o nouă tăietură a cablului, într'un punct mai depărtat decât x.

Aplicând la capătul A al circuitului o tensiune alternativă, curentul pe linie va avea trei componente: o componentă directă i_0, ce se propagă în sensul $A-P$ și două componente i_1 și i_2, reflectate, ce se propagă în sensul $P-A$ (o componentă reflectată în P_1 și alta în P). Ca și la punctul 1, se poate stabili că dacă la frecvența f_1 cei doi curenți reflectați, i_1 și i_2, sunt în fază, ei sunt iarăși în fază la frecvența f_2, dată de relația

$$f_2 - f_1 = \frac{v}{2\,(x - x_1)}, \tag{9}$$

curentul i_2, făcând în plus față de i_1 drumul $P_1 - P - P_1$ de lungime $2\,(x - x_1)$. La frecvențele la care curentul reflectat $i_r = i_1 + i_2$ este minim (cei doi curenți i_1 și i_2 în opoziție de fază), ondulațiile curbei de impedanță sunt minime și la frecvențele la care i_r este maxim (curenții i_1 și i_2 în fază), ondulațiile impedanței vor avea amplitudinea maximă. Amplitudinea ondulațiilor curbei de impedanță va varia deci periodic, în funcție de frecvență, perioada (notată cu F) fiind egală cu diferența dintre două frecvențe, la care cei doi curenți sunt de exemplu în fază, adică

$$F = f_2 - f_1 = \frac{v}{2\,(x - x_1)}.$$

De aici, notând $x - x_1 = x'$, deducem

$$x' = x - x_1 = \frac{v}{2\,(f_2 - f_1)}. \tag{10}$$

Frecvențele f_1 și f_2 corespund, de exemplu, la două minime succesive ale amplitudinii ondulațiilor de pe curba de impedanță.

In locul formulei de mai sus se poate utiliza și relația

$$x' = \frac{\pi}{\beta_2 - \beta_1}, \tag{11}$$

unde β_1 și β_2 sunt valorile constantei de fază a circuitului la frecvențele f_1 și f_2.

Eroarea metodei. Eroarea $\Delta' x$ care se face asupra distanței până la locul defectului este dată de relația

$$\Delta' x = \Delta x' = \delta x' \tag{12}$$

dedusă la fel cu formula (8), corespunzătoare.

Distanța x' este mică, fiind aproximativ egală cu eroarea primei metode și eroarea $\Delta x'$ este în consecință foarte mică.

Din formulele (8) și (11), ținând seama că

$$x' = \Delta x \text{ și } \Delta x = \delta x$$
$$\Delta' x = \delta \Delta x \tag{13}$$

deducem

$$\frac{\Delta' x}{x} = \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 = \delta^2.$$

Rezultă că dacă eroarea relativă dată de prima metodă este δ, cea dată de noua metodă este aproximativ egală cu δ^2.

De exemplu, dacă eroarea la prima metodă este de 5%, ($\delta = 0{,}05$), eroarea dată de a doua metodă este de 0,25%. Presupunând deci $x = 50$ km, prima metodă ne dă o eroare de 2,5 km iar a două metodă, de 0,125 km.

Metoda descrisă mai sus și care se bazează pe măsurători din capătul circuitului este echivalentă cu metoda descrisă la sfârșitul punctului 1, bazată pe măsurători din capătul circuitului și apoi din punctul P, situat la distanța x, unde presupunem că ne-am deplasat cu aparatele. Într'adevăr, măsurând impedanța din punctul x, obținem o curbă ale cărei ondulații au perioada

$$F = \frac{v}{2(x - x_1)}.$$

Exemple: In figura 2 este dată curba părții reale a impedanței la intrare a unui circuit în cablu foarte slab și des încărcat.

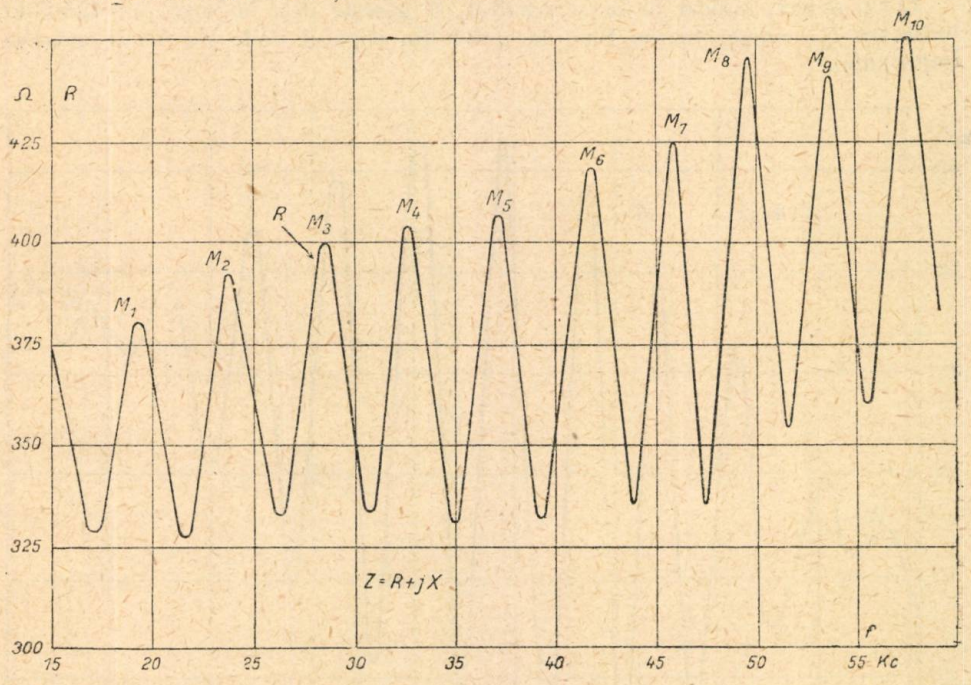

Fig. 2

Lungimea secțiunii măsurate este de circa 62 km. Se observă că ondulațiile impedanței sunt pronunțate. Neglijând partea imaginară a impedanței, care este mică în raport cu cea reală, obținem pentru atenuarea de regularitate la frecvența de 49,8 kc (în punctul M_8), conform formulei (2).

$$A = \ln \frac{|Z_1 + Z|}{|Z_1 - Z|} = \ln \frac{445 + 380}{445 - 380} = 2{,}63 \text{ N}.$$

Valoarea $A = 2{,}63$ N este mult sub limita normală, ceea ce indică prezența unui defect pe circuit.

Izolamentul și rezistența buclei fiind normale, suntem obligați să recurgem pentru localizarea deranjamentului la prima metodă.

Curba impedanței prezintă maximele M_1, M_3, M_5, M_7 și M_9 la frecvențele $f_1 = 11{,}30$ kc, $f_3 = 28{,}50$ kc, $f_5 = 37{,}20$ kc, $f_7 = 45{,}80$ kc și $f_9 = 53{,}7$ kc.

Neavând tabela cu valorile constantei β, s'a folosit formula aproximativă (6). Frecvența de tăiere fiind $f_0 = 92$ kc, s'a obținut următoarele valori: $\beta_1 = 24° 20'$, $\beta_3 = 36° 6'$ și $\beta_5 = 48°$.

Aplicând formula (5), la intervale de frecvență $f_1 - f^3$ și $f_1 - f^5$, obținem pentru numărul de câmpuri de încărcare până la locul defect

$$n_{1-3} = \frac{2 \cdot 180°}{11° 46'} = 30{,}6$$

$$n_{1-5} = \frac{4 \cdot 180°}{23° 40'} = 30{,}4.$$

Locul defect, indicat de acest rezultat, se găsește deci în jurul punctului de încărcare I_{31}, numărătoarea fiind începută din capătul unde s'a făcut măsura impedanței.

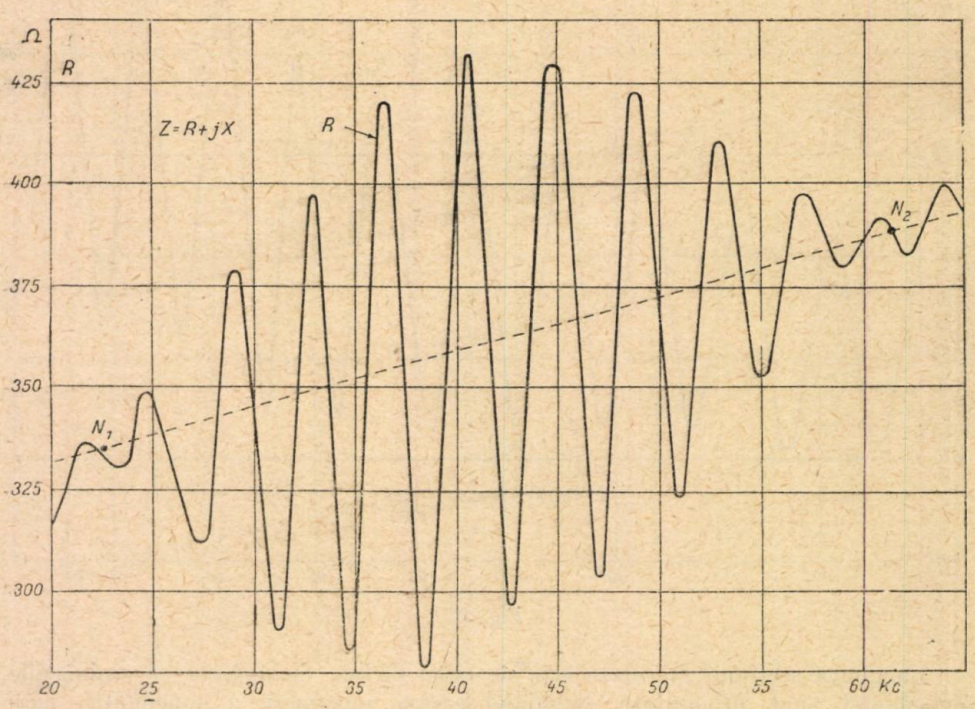

Fig. 3

Pentru a găsi exact locul defect, formula (5) fiind aproximativă, s'a închis circuitul defect în punctul de încărcare P, înainte de bobină, cu o rezistență de 400 Ω și s'a măsurat din nou impedanța la intrare, obținându-se curba din figura 3 conform metodei date la punctul 2.

Această curbă prezintă amplitudinile minime la frecvențele $f'_1 = 22$ kc și $f'_2 = 61$ kc punctele N_1 și N_2.

Calculând valorile β corespunzătoare cu formula (5) și aplicând formula (11), deducem numărul de câmpuri între locul defect și punctul I_{31}

$$n' = \frac{180^\circ}{83^\circ - 28^\circ}.$$

Acest calcul indică deci locul defect în jurul punctului P_{28}. In acest punct a fost găsită o bobină de încărcare cu inductanță mai mare decât cea normală.

Acest exemplu arată că procedeul propus de noi la punctul 2 duce la bune rezultate.

МЕТОД БЫСТРОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИМПЕДАНСНЫХ АВАРИЙ НА ЛИНИЯХ ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Автор описывает хорошо известный метод локализации импедансных аварий на линиях дальней связи с помощью кривой импеданса в начале цепи, а также новый метод, выведенный из вышеописанного, который можно применить после того, как было определено вышеуказанным или каким-нибудь другим способом приблизительное расстояние до места аварии, для уточнения этого расстояния. Этот последний метод базируется на существовании вдоль линии двух близлежащих точек отражения, а именно в месте аварии и в противоположном конце той части линии, которую измеряют и которая для этой цели замыкается сопротивлением соответствующей величины. В этом случае амплитуда колебаний кривой импеданса, являющейся функцией от частоты, получает периодическое изменение, причем этот период F.p.p.s., дает расстояние от места аварии до противоположного конца той части линии, которую измеряют, по формуле:

$$x = \frac{v}{2F},$$

где v — быстрота распространения фазы.

Поскольку расстояние x относительно мало, абсолютная погрешность в определении положения места аварии также невелика, и можно доказать, что если δ является относительной погрешностью, отнесенной к длине поврежденной линии на основании первого метода, то погрешность на основании нового метода будет δ^2.

Метод в особенности применим для кабельных линий.

В конце статьи автор приводит пример, показывающий продуктивность предложенного метода.

MÉTHODE DE LOCALISATION RAPIDE DES DÉFAUTS D'IMPÉDANCE DES LIGNES DE TÉLÉCOMMUNICATION

(RÉSUMÉ)

L'Auteur décrit la méthode bien connue de localisation des défauts d'impédance des lignes de télécommunication, à l'aide de la courbe d'impédance à l'entrée du circuit, et une nouvelle méthode, qui dérive de la première et peut être utilisée à pré-

ciser cette distance, après détermination de la distance approximative au défaut, à l'aide de la première méthode ou d'une autre. La méthode proposée est basée sur l'existence sur la ligne de deux points de réflexion rapprochés: à l'emplacement du défaut et à l'extrémité opposée de la portion de ligne mesurée et fermée, dans ce but, par une résistance d'une valeur convenable. Dans ce cas l'amplitude des oscillations de la courbe de l'impédance, fonction de la fréquence, présente une variation périodique dont la période F.p.p.s. donne la distance du défaut à l'extrémité opposée de la portion de ligne mesurée, selon la formule

$$x = \frac{v}{2F},$$

où v est la vitesse de propagation de la phase.

La distance x étant relativement faible, l'erreur absolue, quant à la position du défaut, est également faible et l'on démontre que, si l'erreur relative rapportée à la longueur de la ligne dérangée, due à la première méthode, est δ, celle qui est due à la nouvelle méthode est δ^2.

La méthode s'applique en particulier aux lignes à câble.

A la fin de l'article, l'Auteur donne un exemple démontrant l'efficacité de la méthode proposée.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ELECTROENERGETICĂ

STUDIU TEHNICO-ECONOMIC PENTRU AMELIORAREA FACTORULUI DE PUTERE

DE

CEZAR PARTENI ANTONI

1. Problema factorului de putere şi ameliorarea sa constitue o chestiune fundamentală în studiile de ansamblu referitoare la electrificarea unor regiuni şi mai cu seamă atunci când se lucrează la electrificarea întregii ţări, situaţie în care ne găsim actualmente.

Precizăm dela început că, prin factor de putere înţelegem raportul dintre puterea reală P_r şi puterea aparentă P_{ap}, adică $k = \frac{P_r}{P_{ap}}$.

Numai în cazul particular când tensiunea şi curentul sunt sinusoidali avem $k = \cos \varphi$, însemnând cu φ decalajul dintre tensiune şi curent.

Necesitatea de a funcţiona cu un factor de putere ridicat este bine cunoscută şi a fost desbătută pe larg în lucrări de specialitate [1], [2].

Se ştie că un factor de putere mic limitează utilizarea instalaţiilor electrice prin pierderi Lenz-Joule şi prin căderi de tensiune. Aceste efecte se manifestă la generatori, la transformatori şi la liniile electrice şi sunt cu atât mai accentuate cu cât factorul de putere este mai scăzut [3].

In toate aceste circuite electrice avem o scădere a randamentului şi o limitare a puterii care se poate produce sau transmite din cauză că la curentul activ se adaugă componenta reactivă şi astfel avem o încălzire mai mare a circuitului respectiv.

2. Ameliorarea factorului de putere se poate face prin anumite măsuri în legătură cu funcţionarea maşinilor şi aparatelor consumatoare de putere reactivă. Când nu reuşim în acest mod, vom recurge la următoarele posibilităţi [4], [5]:

condensatori sincroni, adică motori sincroni supraexcitaţi (comutatrici sau motori asincroni-sincronizaţi),

condensatori statici,

compensatori sau avansori de fază,

vibratori.

In studiul de faţă vom face o comparaţie din punct de vedere tehnic şi economic între primele două posibilităţi, adică între condensatorii sincroni şi cei statici.

3. Dacă utilizăm condensatorii statici, putem avea diferite montaje, care sunt bine cunoscute, dar pe care socotim totuşi util a le reaminti.

Considerăm schema din figura 1 cu un condensator în derivaţie, care poate ocupa poziţia C_1 sau C_2.

Presupunem că alternatorul produce la borne o tensiune U, iar utilizarea prezintă o rezistență R și o inductanță proprie L.

Notăm curentul activ cu I_w și cel reactiv cu I_d la utilizare; vom avea aici un curent $I_w - jI_d$, a cărui valoare eficace va fi $\sqrt{I_w^2 + I_d^2}$.

Curentul în capacitatea C_2 (considerând această poziție) va fi de forma $+jI_{dc}$; curentul în linie va fi $I_w - j(I_d - I_{dc})$, iar valoarea sa eficace $\sqrt{I_w^2 + (I_d - I_{dc})^2}$.

Pe măsură ce I_{dc} se apropie de I_d, ameliorarea factorului de putere este mai bună și când $I_{dc} = I_d$, avem $k = 1$ și curentul în linie este I_w.

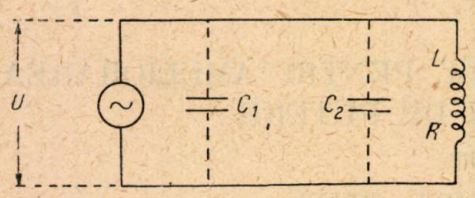

Fig. 1. — Ameliorarea factorului de putere cu condensatori în derivație.

Considerăm acum condensatorul în poziția C_1. De data aceasta reducerea curentului total se face numai în generator, nu și în linie ca mai înainte.

Dacă utilizarea este alimentată prin intermediul unui transformator T, putem așeza condensatorul în pozițiile A, B și C (fig. 2).

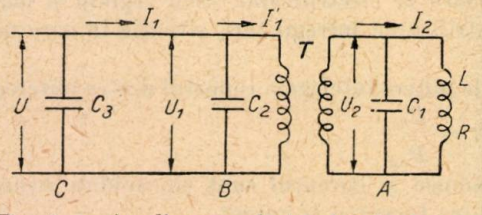

Fig. 2. — Ameliorarea factorului de putere cu condensatori în derivație, când alimentarea se face printr'un transformator.

Punând condensatorul pe secundar în A, bobinajul primar al transformatorului va fi parcurs de un curent mai mic decât dacă am așeza condensatorul în poziția B.

Pe lângă condensatorul din A, am putea monta și condensatorul din B, pentru a compensa factorul de putere introdus de transformator, iar al treilea condensator din C ar ameliora factorul de putere datorit liniei de legătură.

Această schemă (fig. 2) ar fi prea încărcată în ceea ce privește numărul de condensatori. Dacă ar rămâne numai condensatorul din B, am avea diagrama de funcționare din figura 3.

Curentul I_2 la utilizare este decalat cu un unghi φ în urmă față de tensiunea secundară U_2.

Tensiunea primară este trasată în OU. Curentul în primarul transformatorului este OI'_1, iar în condensator I_{c2}, astfel încât curentul în linie va fi OI_1 în faza cu tensiunea de alimentare U. Aceasta provine din tensiunea la bornele primarului OU_1, la care se adaugă căderea de tensiune în linie $U_1 U$.

Condensatorul în derivație are avantajul de a permite realizarea mai ușoară a unui mers sub tensiune constantă.

Inafară de montajul în derivație al condensatorilor, se poate face și montarea în serie după schema din figura 4, care duce la diagrama din figura 5.

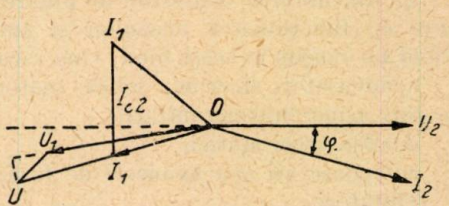

Fig. 3. — Diagramă de funcționare pentru cazul din figura 2, având numai condensatorul B.

La frecvențe în jurul valorii de 1000 se pot întrebuința scheme cu condensatori montați pe transformatori, care se găsesc în derivație în raport cu utilizarea (fig. 6),

sau în serie (fig. 7). Alteori condensatorul poate fi montat pe un autotransformator care se găsește în serie cu circuitul de utilizare, după schema din figura 8.

4. Un condensator montat în derivație este traversat de un curent

$$I_c = C\omega U, \tag{1}$$

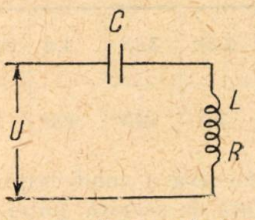

Fig. 4. — Ameliorarea factorului de putere cu condensator în serie.

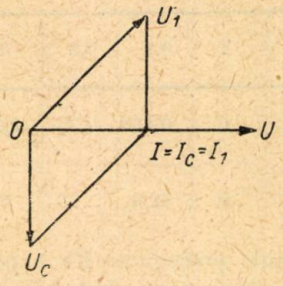

Fig. 5. — Diagrama montajului din figura 4.

unde $\omega = 2\pi f$ este pulsația tensiunii de alimentare.

Puterea reactivă corespunzătoare va fi

$$P_c = UI_c = C\omega U^2 \text{VAR}. \tag{2}$$

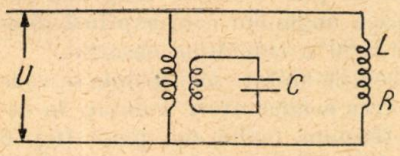

Fig. 6. — Ameliorarea factorului de putere cu condensatori montați în derivație (prin transformator).

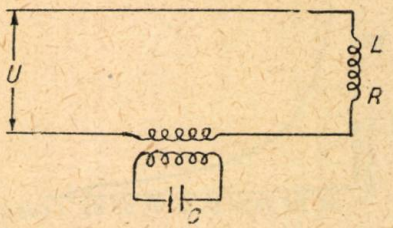

Fig. 7. — Ameliorarea factorului de putere cu condensatori montați în serie (prin transformator).

In general, puterea reactivă, când pe circuit există rezistență, inductanță și capacitate, poate fi pusă sub forma (presupunând că tensiunea și curentul sunt sinusoidali):

$$P_r = UI \sin \varphi,$$

iar puterea activă sub forma (în aceeași ipoteză ca mai sus)

$$P_a = UI \cos \varphi,$$

astfel încât între aceste două puteri avem relația

$$P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi. \tag{3}$$

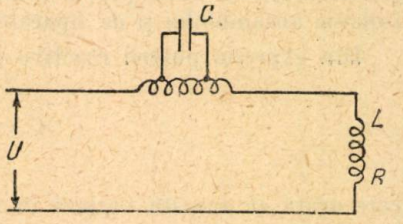

Fig. 8. — Ameliorarea factorului de putere cu condensatori în serie montați pe autotransformator.

Când cos φ este foarte mic, tg φ are valori mari, astfel încât puterea reactivă devine importantă. In tabloul Nr. 1, dăm valorile raportului pentru diverse valori ale lui cos φ, iar în curba din figura 9 se vede cum variază $\frac{P_r}{P_a} = \operatorname{tg} \varphi$ în funcție de cos φ.

La valori mici ale lui cos φ, aşa cum se întâlnesc de exemplu la cuptoare de inducţie, de cca 0,1, constatăm că puterea reactivă devine de 10 ori mai mare decât puterea activă.

TABLOUL Nr. 1

cos φ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05
$\frac{P_r}{P_a} = \text{tg}\,\varphi$	0	0,484	0,75	1,037	1,33	1,73	2,28	3,18	4,9	9,94	19,97
$P_r = \%\, P_a$	0	48,4	75	103	133	173	228	318	490	994	1997

In relaţiile precedente s'a exprimat puterea reactivă a condensatorilor utilizaţi pentru ameliorarea factorului de putere. Inafară de această putere reactivă, trebue să mai luăm însă în consideraţie şi puterea activă absorbită de condensator şi pierdută prin căldură în dielectric. Pierderea de care ne ocupăm este în general foarte redusă în raport cu puterea reactivă produsă, ridicându-se la cel mult 1% şi scăzând până la 0,2%. Se ştie că aceste pierderi se pot reprezenta prin valoarea tangentei trigonometrice a unghiului care exprimă diferenţa până la 90° a curentului absorbit.

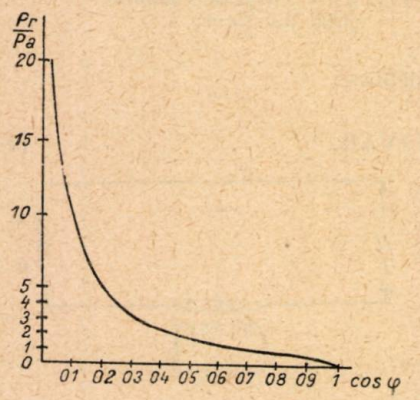

Fig. 9. — Variaţia $\frac{P_r}{P_a} = \text{tg}\,\varphi$ în funcţie de cos φ.

Din schemele arătate mai înainte se vede că putem avea condensatori montaţi în derivaţie pe tensiune înaltă sau joasă (fig. 6 şi fig. 2). Puterile reactive cerute fiind de multe ori importante, condensatorii unitari pot fi grupaţi în serie (cascadă) sau în derivaţie (suprafaţă). Dacă fiecare element lucrează la aceeaşi tensiune, puterea reactivă totală este aceeaşi. Deci, pentru o putere reactivă dată, preţul rămâne constant. Trebue să se ţină seama însă de izolarea ansamblului şi de aparatele respective.

Din expresia puterii reactive (2), putem deduce valoarea capacităţii necesare

$$C = \frac{P_r}{\omega U^2} = \frac{P_r}{2\pi f U^2} \quad \text{în } F,$$

care arată că aceasta variază în raport invers cu pătratul tensiunii la frecvenţă constantă.

Dacă se adoptă o tensiune mai ridicată, preţul total poate fi scăzut într'o oarecare măsură, dar în schimb este posibil ca şi siguranţa de funcţionare să fie ceva mai redusă din cauza dificultăţilor datorite izolaţiei.

5. Să presupunem că preţul pe kVAR produs prin condensatori statici ar fi de p_c lei; dacă puterea reactivă necesară este P_r kVAR, costul total al bateriei de condensatori va fi $p_c\, P_r$ lei, la o anumită tensiune de funcţionare U, deoarece $p_c = f(U)$.

Să presupunem că durata condensatorilor este de a_c ani și să admitem că amortizarea s'ar face în rate anuale egale, care ar fi

$$\frac{p_c P_r}{a_c}$$

Pe lângă aceste cheltueli, mai avem investițiile pentru clădirile care vor adăposti condensatorii statici. Acestea vor fi de forma

$$\frac{p_a P_r}{a_a}$$

în care p_a este cheltuiala de instalare pe kVAR și a_a numărul de ani pentru amortizare

Considerăm acum cheltuelile de exploatare. Ca întreținere vom avea o sumă anuală foarte redusă b_c, pe care o putem pune sub forma

$$b_c = \frac{\alpha P_r p_c}{a_c} + \frac{\gamma p_a P_r}{a_a},$$

în care α este un coeficient care arată raportul dintre cheltuelile de întreținere și amortisment, $\alpha < 1$, iar γ arată raportul dintre cheltuelile de întreținere ale clădirilor și amortizarea acestora.

Se mai adaugă pierderile în dielectricul condensatorilor. Dacă randamentul acestora este η_c, pierderile vor fi

$$\frac{(100 - \eta_c) P_r}{100}$$

în kW. Cu o funcționare anuală de h ore, însemnând cu p_k prețul în lei pe kWO și ținând seamă de valoarea lui b_c, vom avea o cheltuială totală de exploatare care va fi

$$A_c = b_c + \frac{(100 - \eta_c) P_r}{100} h p_k + \frac{p_c P_r}{a_c} + \frac{p_a P}{a_a} =$$

$$= P_r \left[\frac{100 - \eta_c}{100} h p_k + \frac{p_c}{a_c} (1 + \alpha) + (1 + \gamma) \frac{p_a}{a_a} \right] \text{ lei.} \tag{4}$$

6. O altă soluție pentru atingerea aceluiași obiectiv, este utilizarea unui condensator sincron, adică a unui motor sincron supraexcitat. Aceștia sunt, ca și condensatorii statici, generatori de putere reactivă; ei se montează în derivație. La putere aparentă egală, un condensator sincron are, în general, dimensiuni mai mari decât un generator, deoarece inductorul trebue calculat mai larg, curentul de excitație fiind mult mai important pentru a se putea ajunge la furnizare de putere reactivă prin supraexcitare.

Să evaluăm, pentru cazul unui condensator sincron, care ar fi cheltuelile anuale de exploatare.

Notând cu p_m prețul de kVAR produs, inclusiv aparatele de control și manevră, și cu a_m durata în ani, urmează că vom avea o cheltuială de amortizare de

$$\frac{p_m P_r}{a_m}$$

pe an. La aceasta trebue să adăugăm cheltuelile pentru fundație și clădiri, care depind, de asemenea, de puterea motorului instalat, și care sunt în valoare de

$$\frac{p_f P_r}{a_f},$$

p_f fiind cheltuiala de instalare pe kVAR și a_f numărul de ani pentru amortizare.

Randamentul motorului sincron fiind η_m, numărul de ore de funcționare anuală h și prețul în lei pe kWO fiind p_k, vom avea o cheltuială de lei

$$\frac{100 - \eta_m}{100} P_r h p_k,$$

care corespunde pierderilor dintr'un an.

Cheltuelile de întreținere pentru motorul sincron, aparate, clădiri le evaluăm în raport cu puterea instalată; ele vor fi pe an o fracțiune β din suma de amortizare pentru partea electrică, adică

$$\beta \frac{p_m P_r}{a_m}$$

și o fracțiune γ din suma de amortizare pentru construcții, adică

$$\gamma \frac{p_f P_r}{a_f}.$$

Cheltuelile de întreținere vor fi deci de forma

$$b_m = \beta \frac{p_m P_r}{a_m} + \gamma \frac{p_f P_r}{a_f}.$$

în care $\beta < 1$ și $\gamma < 1$.

Rezultă pentru cheltuelile totale de exploatare anuale o relație de forma

$$A_m = b_m + \frac{100 - \eta_m}{100} P_r h p_k + \frac{p_m P_r}{a_m} + \frac{p_f P_r}{a}.$$

Ținând seama de valoarea lui b_m, găsim

$$A_m = P_r \left[\frac{100 - \eta_m}{100} h p_k + \frac{p_m}{a_m} (1 + \beta) + (1 + \gamma) \frac{p_f}{a_f} \right] \text{lei.} \qquad (5)$$

7. Să facem acum o comparație între cele două posibilități descrise mai sus din punctul de vedere al modului de comportare în timpul funcționării și al prețurilor de investiție și de exploatare [2].

a) Condensatorii sincroni asigură un reglaj mult mai precis și absolut continuu al puterii reactive în comparație cu condensatorii statici. In primul caz acest reglaj poate fi foarte fin, realizându-se prin variația reostatului de excitație. In al doilea caz variația puterii reactive nu se poate face decât în trepte, prin eliminarea sau introducerea unuia sau a mai multor condensatori statici. Aceste operații devin destul de delicate în cazul tensiunilor mai ridicate.

b) Condensatorii statici pot fi utilizați în orice împrejurare, pe când la condensatorii sincroni trebue să luăm în considerare modul de comportare a rețelei respective în caz de scurtcircuit și anume în perioada tranzitorie. Prin introducerea unei astfel de mașini este necesar să se examineze situația și din punctul de

vedere al stabilității de funcționare a rețelei. Se poate întâmpla ca uneori aceste calcule să arate imposibilitatea introducerii unui condensator sincron și atunci nu rămâne decât soluția condensatorilor statici.

c) Prin introducerea condensatorilor statici este posibil să se producă deformări importante în ce privește curbele de tensiune și curent, ceea ce nu se întâmplă în cazul condensatorilor sincroni.

d) Siguranța de funcționare este un element care intervine în mod fundamental în alegerea sistemului de compensare. In stadiul actual putem spune că ambii condensatori (statici și sincroni) prezintă aceeași siguranță de funcționare.

e) Bateriile de condensatori statici pot fi ușor divizate și montate unde este necesar, deoarece acestea sunt constituite dintr'o serie de elemente care se pot cupla între ele chiar dacă sunt la oarecare distanță. Se pot așeza și în exterior, în cuve cu ulei, ca transformatorii și condensatorii sincroni, în timp ce condensatorul sincron este o piesă unică care nu poate fi fracționată și a cărei putere este bine determinată.

Condensatorul sincron reclamă uneori o construcție specială, unde urmează să fie montat, împreună cu aparatele respective de control, protecție și manevră, fiind necesare și fundații.

f) Condensatorii statici, fiind imobili, nu necesită decât o foarte slabă supraveghere. Și condensatorii sincroni pot avea o funcționare automată și la distanță, ei necesitând totuși o supraveghere mai atentă decât precedenții.

g) Spre deosebire de condensatorii sincroni, condensatorii statici mai pot ajuta uneori la absorbirea undelor de frecvență ridicată sau de variații rapide. In regim nesinusoidal, curentul în condensatorul static este foarte deformat, ceea ce atrage o creștere a încălzirii și se introduc curenți de armonice superioare în rețea. Pericolele acestea se reduc mult dacă forma curbei de tensiune care alimentează rețeaua respectivă este apropiată de sinusoidă.

h) La condensatorii statici mai există pericolul de rezonanță și deci de supratensiuni ce decurg în anumite împrejurări și care trebue din timp cercetate, aceste fenomene neproducându-se la condensatorii sincroni.

i) Randamentul la condensatorii statici este mult mai ridicat decât la condensatorii sincroni. Pierderile în condensatorii statici sunt de 10—30 ori mai mici decât în condensatorii sincroni.

8. Din punct de vedere al cheltuelilor de investiție am găsit la condensatorii statici

$$C_{ic} = p_c \, P_r + p_a \, P_r \tag{6}$$

iar la condensatorii sincroni

$$C_{im} = p_m \, P_r + p_f \, P_r \, . \tag{7}$$

Cheltuelile pentru clădiri și fundații necesitate de un condensator sincron pot fi evaluate în raport cu prețul pe unitatea de putere reactivă produsă, astfel încât putem scrie $p_f = \lambda \, p_m$ în care $\lambda < 1$; avem deci

$$C_{im} = p_m \, P_r \, (1 + \lambda). \tag{8}$$

La puteri mici, când nu este necesar să se construiască clădiri speciale, λ devine foarte mic, exprimând numai cheltuelile suplimentare necesitate de fundații.

In aceleași condiții putem exprima cheltuelile pentru clădirile necesitate de condensatorii statici prin $p_a = \lambda_1 \, p_c$ cu $\lambda_1 < 1$. Vom avea deci

$$C_{ic} = p_c \, P_r \, (1 + \lambda_1).$$

Facem raportul celor două valori (6) și (7), adică

$$\varepsilon = \frac{C_{ic}}{C_{im}} = \frac{p_c P_r + p_a P_r}{p_m P_r + p_f P_r} = \frac{p_c + p_a}{p_m + p_f}$$

sau

$$\varepsilon = \frac{(1 + \lambda_1) p_c}{(1 + \lambda) p_m} . \tag{9}$$

p_c , adică prețul pe kVAR la condensatorii statici, variază cu tensiunea. Dacă condensatorii sunt montați pe transformatori speciali, ca în figura 6, atunci p_c va cuprinde și prețul acestora.

Pentru a ne da seama mai bine de variația comparativă a cheltuelilor de investiție pentru ambele cazuri, se poate prezenta relația (6) printr'o curbă, luând $C_{ic} = f(p_c)$ pentru o anumită frecvență și tensiune variabilă, iar relația (7) printr'o altă curbă, luând $C_{im} = f(p_m)$ pentru diverse puteri reactive produse de motor în kVAR și pentru diferite tensiuni de alimentare a motorului sincron (inclusiv transformatorul).

După poziția punctului care corespunde puterii P_r kVAR pentru condensatorul sincron în raport cu curba $C_{ic} = f(p_c)$, ne dăm seama dacă din punctul de vedere al cheltuelilor de investiție este mai convenabil a se lua condensatori sincroni, putându-se vedea totodată care ar fi cea mai convenabilă tensiune de adoptat pentru condensatori.

9. In stadiul actual al tehnicii de fabricare a condensatorilor statici, aceștia vor conduce în anumite cazuri la un preț de investiție mai mare decât dacă am lua în considerare condensatorii sincroni. Pe de altă parte, din diverse considerente, nu putem lua întotdeauna tensiunea care dă prețul cel mai redus. In concluzie, presupunem că ne fixăm la soluția condensatori statici, la o anumită tensiune, ceea ce înseamnă o anumită cheltuială p_c lei pe kVAR instalat.

Vom examina acum situația din punctul de vedere al prețurilor de exploatare.

Ținând seamă de valorile (4) și (5), care exprimă aceste cheltueli anuale de exploatare, pentru fiecare sistem în parte, în funcție de numărul de ore de funcționare și de prețul pe kWO, avem

$$\frac{A_m - A_c}{P_r} = \frac{h\, p_k}{100} (\eta_c - \eta_m) + \frac{p_m}{a_m} (1 + \beta) - \frac{p_c}{a_c} (1 + \alpha) + (1 + \gamma) \left(\frac{p_f}{a_f} - \frac{p_a}{a_a} \right). \tag{10}$$

Facem următoarele notații

$$\frac{p_c P_r}{a_c} = \rho \frac{p_m P_r}{a_m} ; \tag{11}$$

$\rho > 1$ dacă $p_c > p_m$, adică în cazul când prețul pe kVAR ar fi mai mare la capacități decât la condensatori sincroni; $a_c < a_m$, durata de viață a condensatorilor este mai mică decât a condensatorilor sincroni.

$$\frac{p_f P_r}{a_f} = \sigma \frac{p_m P_r}{a_m} ;$$

$\sigma < 1$ pentrucă $p_f < p_m$, cheltuelile pentru fundații și clădiri fiind mai mici decât prețul condensatorilor sincroni; $a_f > a_m$ întrucât durata construcțiilor este mai mare decât a mașinilor electrice.

$$\frac{p_a P_r}{a_a} = \sigma_1 \frac{p_c P_r}{a_c} ;$$

$\sigma_1 < 1$ din considerente analoage cu cele de mai sus, adică $p_a < p_c$ și $a_c < a_a$.

Ținând seamă de (11), avem

$$\frac{p_a P_r}{a_a} = \sigma_1 \rho \frac{p_m P_r}{a_m}.$$

După definițiile date la punctul 5, $\frac{\beta}{\alpha} = \mu > 1$; întreținerea condensatorilor statici este foarte redusă în raport cu cea a condensatorilor sincroni; la aceștia din urmă avem uzura cărbunilor la excitatrice și la inelele de alimentare ale rotorului, apoi cuzineți, ulei etc.

$\frac{\gamma}{\alpha} = \nu > 1$. γ și α sunt sub-unitari, însă α fiind foarte mic, cum s'a explicat mai înainte, raportul $\nu > 1$.

Ținând seama de notațiile de mai sus, relația (10) poate fi pusă sub forma

$$\frac{A_m - A_c}{P_r} = \frac{hp_k}{100}(\eta_c - \eta_m) + \frac{p_m}{a_m}\left[1 + \alpha\,(\mu - \rho + \nu\sigma - \nu\sigma_1\rho) - \rho(1+\sigma_1) + \sigma\right].$$

In parantezele mici avem μ, ρ și $\nu > 1$, iar σ și $\sigma_1 < 1$. Valoarea parantezei depinde de valorile relative ale acestor elemente, dar este probabil ca ea să fie pozitivă, deoarece, în general, μ este mai mare decât ρ și σ mai mare decât σ_1.

Insemnăm $\tau = \mu + \nu\sigma$.

$\eta_c - \eta_m = \delta > 1$, deoarece randamentul condensatorilor este sigur mai mare decât al condensatorului sincron; relația precedentă devine

$$\frac{D_{ex}}{P_r} = \frac{A_m - A_c}{P_r} = \frac{hp_k}{100}\delta + \frac{p_m}{a_m}\left[1 - \rho\,(1 + \alpha + \alpha\sigma_1\nu + \sigma_1) \pm \alpha\tau + \sigma\right]. \quad (12)$$

S'a pus dublu semn pentru ca relația să fie valabilă pentru orice valoare a lui τ.

Paranteza din membrul al doilea este posibil să aibă valoare negativă dacă ρ este mai mare.

Pentru a urmări variația funcției, care arată diferența cheltuelilor de exploatare, reprezentată prin relația (12), vom studia derivata acestei expresii, care este

$$\frac{d\,\frac{D_{ex}}{P_r}}{d\rho} = -\frac{p_m}{a_m}(1+\alpha).$$

Produsele $\rho\sigma_1$ și $\rho\sigma_1\alpha\nu$ au fost socotite constante; într'adevăr

$$\sigma_1\rho = \frac{\frac{p_a}{a_a}P_r}{\frac{p_c}{a_c}P_r} \cdot \frac{\frac{p_c}{a_c}P_r}{\frac{p_m}{a_m}P_r} = \frac{\frac{p_a}{a_a}}{\frac{p_m}{a_m}}; \quad (12a)$$

deci $\sigma_1\rho$ poate fi considerat constant, întrucât ultimul membru al egalității cuprinde elemente cunoscute și constante pentru o anumită putere și tensiune. La fel α și ν sunt constante, deci întregul produs va fi constant.

Derivata de mai sus fiind permanent negativă, întrucât p_m, a_m și α sunt cantități pozitive, urmează că funcția va fi tot timpul descrescătoare.

Punând condiția $\frac{D_{ex}}{P_r} = 0$, înseamnă că $A_m = A_c$, adică cheltuelile de exploatare sunt aceleași, fie că utilizăm condensatori statici, fie condensatori sincroni pentru ameliorarea factorului de putere. Urmează că vom avea

$$\frac{hp_k\delta}{100} + \frac{p_m}{a_m}\left[1 - \rho\,(1 + \alpha + \sigma_1 + \alpha\sigma_1\nu) + \sigma \pm \alpha\tau\right] = 0. \qquad (12b)$$

Această ecuație poate fi rezolvată în raport cu unul din elemente, pe care l-am considera necunoscut, de exemplu ρ, adică raportul dintre suma ce revine ca amortizare pentru condensatorii statici și cei sincroni.

In această ipoteză găsim o soluție particulară

$$\rho_0 = \left[\frac{a_m hp_k\delta}{100\,p_m} + 1 + \sigma \pm \alpha\tau - \sigma_1\rho - \sigma_1\rho\alpha\nu\right]\frac{1}{1+\alpha}. \qquad (13)$$

Dacă $\rho > \rho_0$ și presupunând că semnul și valoarea lui $\alpha\tau$ sunt astfel încât $\frac{D_{ex}}{P_r} < 0$, atunci $A_m < A_c$, adică cheltuelile de exploatare anuale sunt mai mici pentru condensatorii sincroni decât pentru condensatorii statici.

Dacă $\rho < \rho_0$, în aceleași ipoteze pentru $\pm\alpha\tau$, avem situația inversă: $\frac{D_{ex}}{P_r} > 0$ și $A_m > A_c$, adică din punctul de vedere al cheltuelilor de exploatare, va fi mai avantajos să avem condensatori statici decât condensatori sincroni.

Relația (12) poate fi pusă sub forma $\frac{D_{ex}}{P_r} = A - B\rho$, în care

$$A = \frac{hp_k\delta}{100} + \frac{p_m}{a_m}(1 \pm \alpha\tau + \sigma - \alpha\rho\sigma_1\nu - \rho\sigma_1)$$

$$B = \frac{p_m}{a_m}(1 + \alpha)$$

și poate fi reprezentată printr'o dreaptă (fig. 10). Deoarece ρ nu poate fi decât pozitiv, urmează că funcția noastră va fi reprezentată printr'o semidreaptă $O'X$. Dând lui ρ valoarea particulară $\rho = \rho_0$, care anulează relația (12), determinăm punctul M, care împarte semidreapta în două regiuni. Pentru punctele de pe semidreaptă situate la stânga lui M, avem valori ale lui ρ mai mici decât ρ_0 și corespunzând deci cazului când condensatorul static este mai convenabil, în ceea ce privește cheltuelile de exploatare și în ipotezele făcute mai înainte. Punctelor de pe semidreaptă situate la dreapta lui M le corespund valori $\rho > \rho_0$ și deci în această regiune condensatorul sincron este mai convenabil din punctul de vedere considerat. Chiar în punctul M, cele două sisteme sunt echivalente dacă ținem seamă de cheltuelile anuale de exploatare.

Presupunând că ρ este cunoscut, se poate rezolva ecuația (12b) în raport cu h sau cu p_k și deci la un anumit cost de investiție deducem care sistem este mai avantajos pentru ameliorarea factorului de putere în următoarele două situații:

— Când numărul de ore de funcționare h este cunoscut, dela ce preț p_{ok} pe kWO este mai convenabil un sistem sau celălalt.

— Când prețul pe kWO este dat, dela ce număr de ore de funcționare h_0 este mai convenabil un sistem sau celălalt.

10. Să examinăm acum diferența dintre prețurile de investiție în cele două alternative, ținând seama de relațiile (6), (7) și (8).

$$D_i = C_{ic} - C_{im} = p_c P_r + p_a P_r - p_m P_r - p_f P_r = P_r\left[p_c(1+\lambda_1) - p_m(1+\lambda)\right],$$

de unde

$$\frac{D_i}{P_r} = p_c(1+\lambda_1) - p_m(1+\lambda). \tag{14}$$

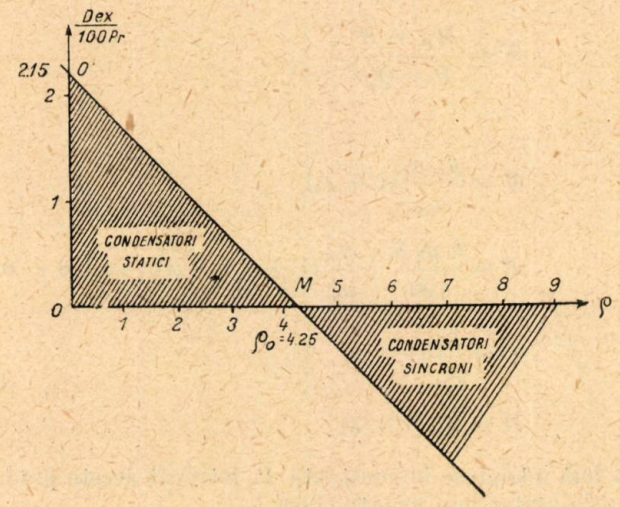

Fig. 10. — Determinarea regiunilor favorabile pentru condensatori statici sau sincroni în funcție de ρ.

Cercetăm raportul dintre diferența de investiție raportată la puterea reactivă necesară (14) și diferența de cheltueli de exploatare raportată la aceeași putere, dată în relația (12); vom avea

$$\frac{\dfrac{D_i}{P_r}}{\dfrac{D_{ex}}{P_r}} = \frac{D_i}{D_{ex}} = \frac{p_c(1+\lambda_1) - p_m(1+\lambda)}{\dfrac{hp_k\delta}{100} + \dfrac{p_m}{a_m}\left[1 - \rho(1+\alpha+\alpha\sigma_1\nu+\sigma_1) \pm \alpha\tau + \sigma\right]} = N. \tag{15}$$

Să interpretăm acest rezultat. Știm că numitorul fracției se anulează pentru o anumită valoare particulară $\rho = \rho_0$. Fracția devine deci infinit de mare, deoarece numărătorul păstrează o valoare finită. Sensul acestui rezultat este următorul: fracția (15) arată raportul dintre diferența cheltuelilor de investiție în cele două ipoteze și diferența cheltuelilor de exploatare anuale. Altfel spus, acest raport indică în câți ani se va acoperi, prin cheltuelile mai reduse de exploatare necesitate de acest sistem, plusul de cheltueli datorit investițiilor prin adoptarea sistemului mai costisitor.

Dacă $\rho = \rho_0$, înseamnă că numitorul este nul, deci după (12) $A_m = A_c$, adică cheltuelile anuale de exploatare sunt egale pentru ambele sisteme și se înțelege că în această ipoteză acoperirea diferenței de cheltueli de investiții nu se mai poate face. Este semnificația concluziei matematice de mai înainte, că această acoperire se face într'un număr infinit de ani.

Ținând seama de valoarea lui ρ (11), deducem

$$p_c = \frac{\rho\, p_m\, a_c}{a_m}.$$

Inlocuind pe p_c în (15), ajungem la o relație de forma

$$N = \frac{M\rho - R}{P - Q\rho}, \tag{16}$$

în care

$$\left.\begin{aligned} M &= \frac{p_m\, a_c}{a_m}(1 + \lambda_1) \\ P &= \frac{h\, p_k\, \delta}{100} + \frac{p_m}{a_m}(1 \pm \alpha\,\tau - \alpha\,\sigma_1\,\nu\rho + \sigma - \sigma_1\,\rho) \\ Q &= \frac{p_m}{a_m}(1 + \alpha) \\ R &= p_m(1 + \lambda) \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

$\sigma_1\,\rho$ și $\alpha\,\sigma_1\,\nu\,\rho$ au fost introduse în constanta P, întrucât aceste produse sunt constante, după cum s'a arătat mai înainte (12a).

Vom studia variația lui N, adică a numărului de ani în care diferența de cheltueli de investiție se acoperă prin economiile rezultate în exploatare, în funcție de ρ, adică raportul sumelor de amortizare ce revin pentru cele două sisteme de ameliorare a factorului de putere.

Derivata expresiei (16) în raport cu ρ este

$$\frac{dN}{d\rho} = \frac{MP - QR}{(P - Q\rho)^2}.$$

Semnul acestei derivate depinde de valorile constantelor M, P, Q și R, însă este independent de ρ. Va fi deci tot timpul pozitiv sau negativ, deci funcția N va varia în același sens (crescând sau descrescând).

Pentru valoarea $\rho_\infty = \frac{P}{Q}$, numitorul funcției (16) se anulează, ceea ce duce la valoarea $N = \infty$. Aceasta înseamnă, după cum s'a arătat, că surplusul de cheltueli pentru investiție a sistemului mai scump nu se poate niciodată acoperi prin economia rezultată din diferențele de cheltueli de exploatare.

Valoarea lui $\rho_0' = \frac{R}{M}$ duce la rezultatul $N = 0$; aceasta înseamnă că numărătorul fracției (15) se anulează; prin urmare, diferența de investiții (14) se acoperă imediat (adică în mai puțin de 1 an) din economiile de exploatare.

Se înțelege că ρ nu poate fi decât pozitiv și că va varia între cele două valori de mai înainte, admițând că N trebue de asemenea să fie pozitiv. Intervalul de variație a lui ρ se limitează și mai mult din considerentul următor. Amortizarea sistemului mai scump, de exemplu al condensatorilor statici, se face în a_c ani; prin urmare rezultă condiția $N \leqslant a_c$, deoarece nu putem conta pe funcționarea unui sistem în condiții normale decât în limita numărului de ani admiși pentru amortizare. Dând lui N valoarea a_c, calculăm valoarea corespunzătoare a lui ρ, pe care o însemnăm cu ρ_{a_c}, și care este

$$\rho_{a_c} = \frac{Pa_c + R}{M + Qa_c}.$$

Deci ρ va varia între limitele

$$\rho'_0 = \frac{R}{M} \qquad \text{pentru care } N = 0 \text{ și}$$

$$\rho_{a_c} = \frac{Pa_c + R}{M + Qa} \quad \text{pentru care } N = a_c.$$

Curba care reprezintă funcția (16) are două asimptote

$$\rho = \infty \qquad N = -\frac{M}{Q}$$

$$\rho = \frac{P}{Q} \qquad N = \infty$$

și o putem reprezenta în figura 11.

Dacă în expresia (16) se satisface relația

$$RQ - MP = 0, \tag{18}$$

atunci

$$N = -\frac{M}{Q} = -\frac{R}{P} \tag{19}$$

este indiferent de valoarea lui ρ. Aceasta înseamnă că timpul de acoperire a cheltuelilor de investiție prin economia rezultată din exploatare nu depinde de raportul în care se găsesc valorile amortizărilor în cele două cazuri considerate.

După cum se vede din relația (17), coeficienții M, Q și R nu pot fi decât pozitivi; pentru ca să subziste relația (19) trebue ca neapărat și P să fie tot pozitiv.

In această situație urmează că N va fi întotdeauna negativ, dacă vrem ca relația (18) să fie satisfăcută, adică N să fie indiferent de valoarea lui ρ. Dar N negativ ar părea fără sens; să vedem totuși cum s'ar putea interpreta. După relația de definire a lui N (15) pentru ca acesta să fie negativ este necesar ca numărătorul sau numitorul fracției să fie mai mic decât zero. Dacă $D_{ex} < 0$, după (12) urmează că $A_m - A_c < 0$, adică $A_c > A_m$, ceea ce înseamnă să avem cheltueli de exploatare mai mari pentru condensatorii statici decât pentru cei sincroni, ceea ce știm că nu corespunde realității, situația practică fiind inversă. Deci, această ipoteză se elimină. Rămâne posibil ca $D_i < 0$, adică $C_{ic} - C_{im} < 0$ sau $C_{im} > C_{ic}$. Altfel spus, cheltuelile de investiție pentru condensatorii statici ar trebui să fie mai mici decât pentru cei sincroni. Această ipoteză poate fi adevărată într'un anumit stadiu de desvoltare a fabricației condensatorilor statici și poate fi luată în considerare.

Deci, după calculele făcute de noi, $N < 0$ are semnificația că este necesar ca cheltuielile de investiție pentru condensatorii statici să fie mai mici decât pentru cei sincroni și, în această situație, N va continua să reprezinte numărul de ani în care diferența de cheltueli de investiție se va acoperi prin diferența de cheltueli de exploatare, dacă vrem ca N să fie indiferent de ρ, adică de raportul cheltuelilor de investiție a celor două sisteme comparate.

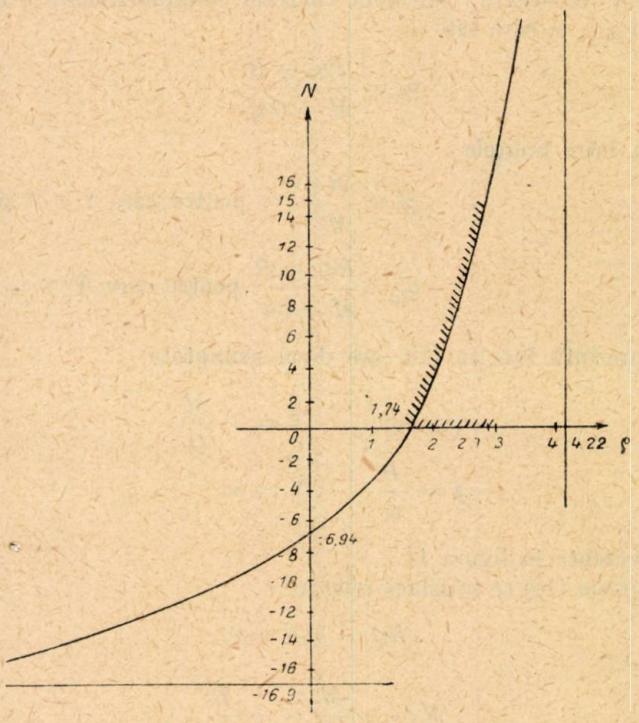

Fig. 11. — Variația lui N (ani) în funcție de ρ.

Ținând seamă de valorile din (17), relația (18) devine

$$p_m(1+\lambda)(1+\alpha) - a_c\left[\frac{hp_k\delta}{100} + \frac{p_m}{a_m}(1 \pm \alpha\tau + \sigma - \sigma_1\rho - \alpha\sigma_1\rho\nu)\right](1+\lambda_1) = 0. \quad (20)$$

Această ecuație conține mai mulți parametri care pot fi variabili. Ea poate fi rezolvată în raport cu unul din acești parametri, presupunându-i pe ceilalți cunoscuți. Astfel, putem deduce pe a_c, adică durata condensatorilor statici, dacă celelalte elemente sunt fixate în ipoteza inițială ca N să fie independent de ρ.

Avem

$$a_c = \frac{p_m(1+\lambda)(1+\alpha)}{\left[\frac{hp_k\delta}{100} + \frac{p_m}{a_m}(1 \pm \alpha\tau + \sigma - \sigma_1\rho - \alpha\sigma_1\rho\nu)\right](1+\lambda_1)}. \quad (21)$$

Dacă a_c astfel calculat are o valoare mai mică decât a_c admis pentru durata condensatorilor statici, urmează că unii parametri nu sunt convenabil aleși. Să

cercetăm, de exemplu, care ar fi prețul p_k pe kWO, care ne-ar da valoarea a_c. Rezolvând ecuația (20) în raport cu p_k, găsim

$$p_k = \frac{100}{h\delta}\left[\frac{p_m(1+\lambda)(1+\alpha)}{a_c(1+\lambda_1)} - \frac{p_m}{a_m}(1+\alpha\tau+\sigma-\tau_1\rho-\alpha\sigma_1\rho\nu)\right] \qquad (22)$$

care va fi prețul pe kWO necesar pentru ca a_c să aibă valoarea fixată și în ipoteza ca N să fie independent de ρ.

Verificăm condiția $N \leqslant a_c$; examinăm valoarea lui N, dată de relația (19); ținând seamă de relațiile (17), avem

$$-N = -\frac{M}{Q} = -\frac{\frac{p_m a_c}{a_m}(1+\lambda_1)}{\frac{p_m}{a_m}(1+\alpha)} = -a_c\frac{1+\lambda_1}{1+\alpha},$$

considerând că $C_{ic} < C_{im}$ și deci $N < 0$.

Condiția fixată ($N \leqslant a_c$) este îndeplinită atunci când

$$\lambda_1 \leqslant \alpha, \qquad (23)$$

deci când proporția de cheltueli necesitată de clădirile condensatorilor statici în raport cu cheltuelile totale este mai mică sau egală în comparație cu cheltuelile de întreținere ale acestora raportate la suma prevăzută ca amortizare.

Revenim la cazul general când nu se pune condiția ca N să fie independent de ρ.

Din relația (15) putem deduce

$$hp_k = \frac{100}{\delta}\left(\frac{M\rho - R}{N} + Q\rho\right) + B', \qquad (24)$$

în care

$$B' = -\frac{100\,p_m}{a_m\,\delta}(1 \pm \alpha\tau - \sigma_1\rho\nu\alpha + \sigma - \sigma_1\rho). \qquad (25)$$

Pentru un anumit ρ, dând lui N diferite valori, în limitele admise, găsim pentru fiecare N o hiperbolă care reprezintă legătura între h și p_k, adică între numărul de ore de funcționare și prețul în lei pe kWO. La fiecare ρ vom avea o familie de hiperbole care se pot trasa.

Dând și lui N diferite valori, vom putea trasa mai multe familii de hiperbole, care vor da perechi de valori corespunzând condițiilor fixate pentru ρ și N.

In funcție de parametrul dat, de prețul pe kWO sau de orele de funcționare, vom putea determina celălalt element, care să satisfacă toate condițiile cerute.

11. *Exemplu numeric* — Să presupunem că avem un consumator care necesită o putere $P_a = 1000$ kW, iar factorul de putere al instalației este $k = 0{,}06$.

Pentru a aduce factorul de putere la unitate, va fi necesară o putere reactivă, după (3).

$P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi = 1000.\ 16{,}6 = 16600$ kVAR.

Operația de ameliorare a factorului de putere se poate face cu condensatori statici sau cu condensatori sincroni. Vom aplica cele studiate mai înainte.

Presupunem următoarele valori numerice:

$h = 4000$ ore de funcționare anual;

$p_k = 1$ leu/kWO;

$\eta_c = 99\%$, randamentul la condensatorii statici (se poate lua și 99,5%);
$\eta_m = 95\%$, randamentul la condensatorii sincroni;
$\delta = \eta_c - \eta_m = 99 - 95 = 4$;
$p_m = 1250$ lei/kVAR produs la condensatorii sincroni;
$a_m = 25$ de ani, durata de amortizare la condensatorii sincroni;
$a_c = 15$ ani, durata de amortizare la condensatorii statici;
$\alpha = 0,02 = 2\%$ reprezintă cheltuelile de întreținere anuale la condensatori, în raport cu suma prevăzută ca amortizare;
$\beta = 0,10 = 10\%$, cheltuelile de întreținere anuale pentru partea electrică, în cazul condensatorului sincron, în raport cu suma prevăzută la amortizare;
$\gamma = 0,10 = 10\%$, cheltueli de întreținere pentru construcții, în raport cu suma prevăzută la amortizare;
$\lambda = 0,20 = 20\%$, proporția pentru cheltuelile necesitate de clădiri și fundații la condensatorii sincroni, în raport cu prețul acestora;
$\lambda_1 = 0,15 = 15\%$, proporția pentru cheltuelile necesitate de clădiri la condensatorii statici, în raport cu prețul acestora;
$p_f = 175$ lei/kVAR, cheltueli de investiții pe kVAR la condensatorii sincroni;
$a_f = 35$ de ani durata de amortizare a construcțiilor;
$p_a = 125$ lei/kVAR, cheltueli de investiție pe kVAR la condensatorii statici; am considerat $p_a < p_f$. Dacă situația aceasta ar fi schimbată, toate calculele se urmează la fel, urmând a se trage concluziile ce vor rezulta.
$a_a = 35$ de ani, durata de amortizare a construcțiilor.

$$\sigma = \frac{\frac{p_f}{a_f}}{\frac{p_m}{a_m}} = \frac{\frac{175}{35}}{\frac{1250}{25}} = 0,1$$

$$\sigma_1 \rho = \frac{\frac{p_a}{a_a}}{\frac{p_m}{a_m}} = \frac{\frac{125}{35}}{\frac{1250}{25}} = 0,0714$$

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{0,1}{0,02} = 5$$

$$\nu = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{0,1}{0,02} = 5$$

$$\tau = \mu + \nu\sigma = 5 + 5.0,1 = 5,5.$$

Ajungem astfel la ecuația (12)

$$\frac{D_{ex}}{P_r} = \frac{A_m - A_c}{P_r} = \frac{4000.1.4}{100} + \frac{1250}{25}\Big[1 - \rho(1 + 0,02) - 0,0714.5.0,02 + 0,02.5,5 - 0,0714 + 0,1\Big]$$

$$\frac{D_{ex}}{P_r} = 51\,(4,25 - \rho).$$

Ecuația $4{,}25 - \rho = 0$
dă ca soluție $\rho_0 = 4{,}25$,
iar reprezentarea o avem în figura 10.

Din figură se vede că luând pentru ρ valori mai mari decât $\rho_0 = 4{,}25$, vom avea pentru $\frac{D_{ex}}{P_r}$ valori negative, adică $A_m < A_c$, deci cheltuelile de exploatare pentru condensatorii sincroni vor fi mai mici decât pentru condensatorii statici.

Dacă luăm pentru ρ valori mai mici decât $\rho_0 = 4{,}25$, avem situația inversă, deoarece $\frac{D_{ex}}{P_r} > 0$ și prin urmare $A_m > A_c$, deci cheltuelile de exploatare anuale vor fi acum mai mari pentru condensatorii sincroni și deci condensatorii statici vor fi mai avantajoși.

Nu putem însă lua pentru ρ valori negative, căci n'ar avea niciun sens. Punctul M împarte semidreapta în două regiuni cum s'a explicat mai înainte.

Trecem acum la relațiile (16) și (17); avem

$$N = \frac{862{,}5\rho - 1500}{216{,}5 - 51\rho} = \frac{16{,}9\rho - 29{,}4}{4{,}25 - \rho} \tag{16a}$$

$$\left.\begin{aligned} M &= 1250 \cdot \frac{15}{25}(1 + 0{,}15) = 862{,}5 \\ P &= \frac{4000 \cdot 1 \cdot 4}{100} + \frac{1250}{25}(1 + 0{,}02 \cdot 5{,}5 - 0{,}02 \cdot 0{,}0714 \cdot 5 + \\ &\qquad + 0{,}1 - 0{,}0714) = 216{,}5 \\ Q &= \frac{1250}{25}(1 + 0{,}02) = 51 \\ R &= 1250\,(1 + 0{,}2) = 1500. \end{aligned}\right\} \tag{17a}$$

Derivata funcției N va fi

$$\frac{dN}{d\rho} = \frac{862{,}5 \cdot 216{,}5 - 51 \cdot 1500}{(216{,}5 - 51\rho)^2} > 0,$$

deci funcția este permanent crescătoare.

Pentru

$$\rho_\infty = \frac{216{,}5}{51} = 4{,}25 \text{ avem } N = \infty$$

$$\rho_0' = \frac{1500}{862{,}5} = 1{,}74 \text{ avem } N = 0.$$

Trebue să avem $N \leqslant a_c$ sau $N \leqslant 15$, ceea ce duce la valoarea

$$\rho_{15} = \frac{216{,}5 \cdot 15 + 1500}{862{,}5 + 51 \cdot 15} = 2{,}915.$$

Deci ρ variind între limitele

$$1{,}74 < \rho < 2{,}915$$

N va trece dela 0 la 15 ani.

Relația (16a) poate fi reprezentată prin curba din figura 11.

Asimptotele sunt

$$N = -\frac{M}{Q} = -\frac{862{,}5}{51} = -16{,}9 \text{ când } \rho = \infty$$

$$\rho = \frac{P}{Q} = \frac{216{,}5}{51} = 4{,}25 \qquad \text{când } N = \infty.$$

Pe de altă parte $N = 0$, când $\rho_0 = 1{,}74$, iar curba nu poate ajunge să aibă asimptota $\rho = 4{,}25$, deoarece din considerarea valorii maxime admise, $N = a_c = 15$ ani, nu putem trece de valoarea $\rho = 2{,}915$.

Prin urmare, în condițiile fixate în acest exemplu numeric, raportul ρ între valoarea amortizării condensatorilor statici și a celor sincroni va putea varia între 1,74 și 2,915. Dacă prețurile sunt astfel încât ieșim din aceste limite și anume $\rho < 1{,}74$, atunci $N < 0$, ceea ce înseamnă, după discuțiile de mai înainte, că $C_{im} > C_{ic}$, adică cheltuelile de investiție pentru condensatorii sincroni ar fi mai mari decât pentru condensatorii statici. In cazul că $\rho > 2{,}915$, avem $N > 15$ ani și deci acoperirea acelorași cheltueli se face într'un timp prea lung și soluția nu este avantajoasă.

12. Trecând acum la cheltuelile de investiție, luăm în considerație relația (9) ținând seamă de (11),

$$\varepsilon = \frac{(1+\lambda_1)\, p_c}{(1+\lambda)\, p_m} = \frac{(1+\lambda_1)\dfrac{p_c}{a_c}\, a_c P_r}{(1+\lambda)\dfrac{p_m}{a_m}\, a_m P_r} = \frac{\dfrac{p_c}{a_c} P_r}{\dfrac{p_m}{a_m} P_r} \cdot \frac{(1+\lambda_1)\, a_c}{(1+\lambda)\, a_m} = \rho\, \frac{(1+\lambda_1) a_c}{(1+\lambda)\, a_m}. \tag{26}$$

In cazul nostru

$$\varepsilon = \rho \frac{(1+0{,}15)\cdot 15}{(1+0{,}2)\cdot 25} = 0{,}575\, \rho;$$

deoarece ρ variază între 1,74 și 2,915, urmează că ε poate avea valori între 1 și 1,68.

Din relația (26) avem

$$p_c = \frac{\varepsilon (1+\lambda)\, p_m}{1+\lambda_1} = \frac{\varepsilon (1+0{,}2)\cdot 1250}{1+0{,}15} = 1305\varepsilon$$

și deci, în ipotezele admise, prețul pe kVAR la condensatori poate ajunge până la

$$p_c = 1{,}68.1305 = 2200 \text{ lei}.$$

Depășind acest preț, condensatorii statici nu mai sunt convenabili, deoarece $N > 15$ ani.

Dacă vrem ca N să nu depindă de ρ, este necesar ca relațiile (18) și (20) să fie satisfăcute. Să presupunem că a_c, durata condensatorilor statici, este considerată ca necunoscută, iar celelalte elemente sunt determinate. Din relația (21) obținem

$$a_c = \frac{1250\,(1+0{,}2)\,(1+0{,}02)}{\left[\frac{4000.1.4}{100}+\frac{1250}{25}(1+0{,}02\cdot 5{,}5+0{,}1-0{,}0714-0{,}0714\cdot 5\cdot 0{,}02)\right](1+0{,}15)} = 6{,}1 \text{ ani.}$$

Am admis însă pentru condensatorii statici o viață mai lungă de 15 ani, încât soluția rezultată nu ne dă o concluzie avantajoasă, pentru valorile date diferiților parametri.

Vom urmări acum p_k, adică prețul pe kWO, care ar rezolva problema pusă, în ipoteza admisă că $a_c = 15$ ani.

Introducând valorile numerice în relația (22), avem

$$p_k = \frac{100}{4000.4}\left[\frac{1250\,(1+0{,}2)\,(1+0{,}02)}{15\,(1+0{,}15)} - \frac{1250}{25}(1+0{,}02.5{,}5-0{,}0714+\right.$$
$$\left.+0{,}1-0{,}0714.5.0{,}02)\right] = 0{,}20 \text{ lei/kWO.}$$

La noul preț pe kWO, constanta P devine, din (17),

$$P = \frac{4000.0{,}20\cdot 4}{100}+\frac{1250}{25}(1+0{,}02.5{,}5+0{,}1-0{,}0714-0{,}0714.5.0{,}02) = 88{,}5$$

și atunci, la prețul de 0,20 lei/kWO, cu condițiile admise în aceste calcule, timpul necesar pentru acoperirea diferenței de cheltueli de investiție prin diferența de cheltueli de exploatare este după relația (19):

$$N = -\frac{862{,}5}{51} = -16{,}9 = -\frac{1500}{88{,}5}.$$

Prin urmare, pentru ca N să fie independent de ρ, trebue să avem împlinită condiția referitoare la prețul pe kWO (22), în care caz $N = -16{,}9$. După interpretarea dată mai înainte, semnul negativ arată că pentru condensatorii statici cheltuelile de investiție sunt mai mici decât pentru cei sincroni, adică $C_{ic} < C_{im}$. In ipoteza admisă, $N = 16{,}9$ ani, cifră ce depășește durata de 15 ani fixată pentru condensatorii statici.

Pentru a avea $N \leqslant a_c$, adică $N \leqslant 15$ ani, trebue să satisfacem condiția (23) ca $\lambda_1 \leqslant \alpha$. In cazul nostru $\alpha < \lambda_1$ $(0{,}02 < 0{,}15)$ și deci nu este posibil ca $N \leqslant a_c$ atunci când vrem ca N să fie independent de ρ.

Calculăm acum coeficientul B' din relația (25) și avem

$$B' = -\frac{100.1250}{25.4}(1+0{,}02.5{,}5+0{,}1-0{,}0714-0{,}0714.5.0{,}02) = -1410.$$

Relația (24) devine

$$hp_k = \frac{100}{4}\left(\frac{862{,}5\,\rho-1500}{N}+51\,\rho\right)-1410 = \frac{21550\,\rho-37500}{N}+1275\,\rho-1410.$$

In cazul pe care îl examinăm avem

$$1{,}74 < \rho < 2{,}915$$

$$0 < N < 15 \text{ ani.}$$

Considerăm pentru ρ valorile extreme și media lor, adică

$1{,}74; \frac{1{,}74+2{,}915}{2} = 2{,}32$ și $2{,}915$. Obținem pentru hp_k

$$(hp_k)_{\min} = \frac{21550.1{,}74 - 37500}{N} + 1275.1{,}74 - 1410 = \frac{0}{N} + 810 = 810$$

$$(hp_k)_{\text{mij}} = \frac{21550.2{,}32 - 37500}{N} + 1275.2{,}32 - 1410 = \frac{12520}{N} + 1535$$

$$(hp_k)_{\max} = \frac{21550 \cdot 2{,}915 - 37500}{N} + 1275.2{,}915 - 1410 = \frac{25300}{N} + 2310.$$

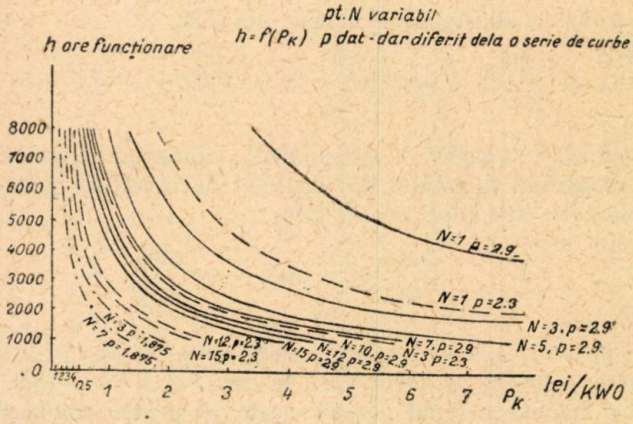

Fig. 12. — $h = f(p_k)$, numărul de ore de funcționare în funcție de prețul p_k, pe kWO pentru diferite valori ale raportului ρ și ale numărului de ani N.

Mai calculăm hp_k pentru $\rho_1 = 1{,}875$, valoare obținută făcând $N = 1$ an în relația ρ_{a_c}. Am putea calcula hp_k și pentru alte valori ale lui ρ, ceea ce nu este însă necesar. Cu ajutorul datelor obținute întocmim tablourile Nr. 2, Nr. 3, Nr. 4 și Nr. 5 precum și curbele din figura 12, care reprezintă o familie de hiperbole.

TABLOUL Nr. 2

$hp_k = 810$ pentru $\rho = 1{,}74$

h ore	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
p_k	0,81	0,405	0,27	0,202	0,162	0,135	0,116	0,101

TABLOUL Nr. 3

$$hp_k = \frac{12520}{N} + 1535 \text{ pentru } \rho_{med} = 2{,}032$$

N	1	3	5	7	10	12	15
hp_k	14055	5708	4039	3325	2787	2578	2369
h ore	p_k lei/kWO	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k
1000	14,05	5,71	4,04	3,33	2,79	2,58	2,37
2000	7,03	2,86	2,02	1,67	1,40	1,29	1,19
3000	4,69	1,90	1,35	1,11	0,93	0,86	0,79
4000	3,52	1,43	1,01	0,84	0,70	0,65	0,60
5000	2,81	1,14	0,81	0,66	0,56	0,52	0,48
6000	2,35	0,95	0,68	0,56	0,47	0,43	0,40
7000	2,01	0,81	0,58	0,48	0,40	0,37	0,34
8000	1,76	0,71	0,51	0,42	0,35	0,33	0,30

TABLOUL Nr. 4

$$hp_k = \frac{25300}{N} + 2310 \text{ pentru } \rho_{max} = 2{,}915$$

N	1	3	5	7	10	12	15
hp_k	27810	10943	7570	6124	5040	4618	4196
h ore	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k
1000	27,81	10,94	7,57	6,12	5,04	4,61	4,20
2000	13,91	5,47	3,78	3,06	2,52	2,30	2,10
3000	9,27	3,64	2,52	2,04	1,68	1,53	1,40
4000	6,95	2,74	1,89	1,53	1,20	1,15	1,05
5000	5,56	2,19	1,51	1,22	1,01	0,92	0,84
6000	4,63	1,82	1,26	1,02	0,84	0,76	0,70
7000	3,97	1,56	1,08	0,87	0,72	0,66	0,60
8000	3,47	1,37	0,94	0,76	0,63	0,57	0,52

TABLOUL Nr. 5

$$hp_k = \frac{2900}{N} + 980 \text{ pentru } \rho_1 = 1{,}875$$

N	1	3	5	7	10	12	15
hp_k	3880	1946	1560	1394	1270	1221	1173
h ore	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k	p_k
1000	3,88	1,94	1,56	1,39	1,27	1,22	1,17
2000	1,94	0,97	0,78	0,69	0,63	0,61	0,58
3000	1,29	0,64	0,52	0,46	0,42	0,40	0,39
4000	0,97	0,48	0,39	0,34	0,31	0,30	0,29
5000	0,77	0,38	0,31	0,28	0,25	0,24	0,23
6000	0,64	0,32	0,26	0,23	0,21	0,20	0,19
7000	0,55	0,27	0,22	0,19	0,18	0,17	0,17
8000	0,48	0,24	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15

Calculând hp_k pentru diferite alte valori pe care le-am da lui N și ρ, putem avea o rețea destul de deasă de curbe care să permită citirile intermediare. In cazul numeric considerat, aceste curbe arată legătura între cei 4 parametri variabili: numărul de ore de funcționare h, prețul pe kWO p_k, numărul de ani N și raportul ρ definit prin relația (11). Fixându-ne 2 sau 3 din acești parametri, îi putem deduce pe ceilalți, fie printr'o familie de curbe dacă sunt cunoscuți 2 parametri, fie printr'o curbă dacă cunoaștem 3 parametri.

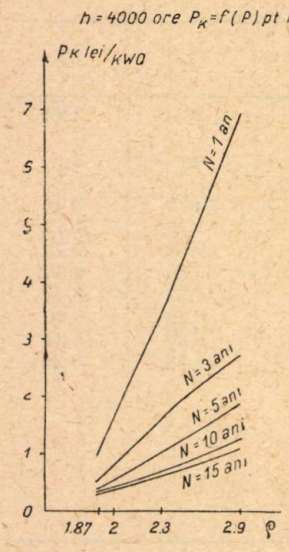

Fig. 13. — $p_k = f(\rho)$ prețul pe kWO în funcție de raportul ρ pentru $h = 4000$ ore de funcționare.

In figura 13 am reprezentat $p_k = f(\rho)$ pentru $h = 4000$ ore de funcționare, N luând diferite valori. Se observă clar, că prețul pe kWO este cu atât mai mic cu cât ρ este mai redus, adică raportul de prețuri este mai mic, iar numărul de N ani mai mare, deci acoperirea diferențelor de cheltueli se face într'un timp mai îndelungat.

Datele numerice se găsesc în tabloul Nr. 6.

Cu datele din tablourile Nr. 3, Nr. 4 și Nr. 5, putem trasa curbele din figura 14, în care s'a urmărit $p_k = f(N)$ pentru $h = 4000$ ore de funcționare, ρ având anumite valori în limitele admisibile. Examinând aceste curbe, observăm că la N mic, adică la termene scurte de acoperire a cheltuelilor de investiție prin acele de exploatare, rezultă preț mare p_k pentru energia electrică.

Când energia electrică este ieftină, cheltuelile de exploatare sunt simțitor de reduse (acele provenind din diferența de randament) și în acest caz termenul de acoperire a diferenței de preț de investiție necesită un timp mai îndelungat.

TABLOUL Nr. 6

$h = 4000$

r ρ \ N	1	3	5	7	10	12	15
2,915	$p_k = 6{,}95$	2,74	1,89	1,53	1,20	1,15	1,05
2,32	$p_k = 3{,}52$	1,43	1,01	0,84	0,70	0,65	0,60
1,875	$p_k = 0{,}97$	0,48	0,39	0,34	0,31	0,30	0,29

TABLOUL Nr. 7

a_c	0	1	2	3	5	7	10	12	15
ρ_N	1,74	1,875	2	2,12	2,32	2,47	2,68	2,78	2,91

In figura 15 s'a trasat valoarea lui ρ când N variază dela 0—15 ani. S'a calculat ρ_N din relația respectivă, valorile găsindu-se în tabloul Nr. 7.

ρ_N variază în limitele stabilite, aici fiind date valorile intermediare, și totodată se poate observa forma curbei și deci modul de variație a lui ρ_N.

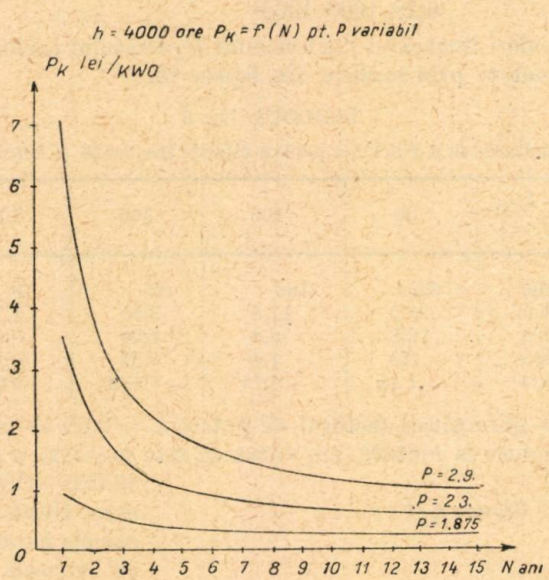

Fig. 14.—$p_k = f(N)$, preț pe kWO în funcție de numărul de ani N pentru diferitele valori ale raportului ρ și pentru $h = 4000$ ore de funcționare.

13. Din relația (2) putem deduce capacitatea necesară, dacă adoptăm condensatori statici pentru 1 kVAR la diferite frecvențe și tensiuni. In acest caz relația devine

$$P_c = 1000 \text{ VAR} = C\,\omega\,U^2 = 6{,}28\,fCU^2$$

de unde

$$C = \frac{1000}{6{,}28\,f\,U^2} \text{ în } F.$$

Considerând frecvența $f = 50$ și tensiunea $U = 100$ V, capacitatea necesară va fi

$$C_{50}^{100} = \frac{1000}{6{,}28.50.100^2} =$$

$$= 320\ \mu F/\text{kVAR}.$$

La aceeași frecvență și tensiunea $U = 1000$ V, vom avea

$$C_{50}^{1000} = \frac{1000}{6{,}28.50.1000^2} =$$

$$= 3{,}2\ \mu F/\text{kVAR};$$

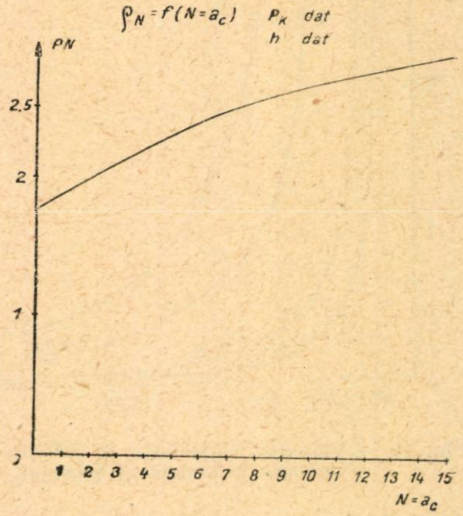

Fig. 15.—$\rho_N = f(N = a_c)$, raportul ρ funcție de numărul de ani $N = a_c$, pentru $h = 4000$ ore de funcționare și $p_k = 1$ leu/kWO.

dacă frecvența ar fi $f = 1000$, capacitatea necesară va fi

$$C_{1000}^{1000} = \frac{1000}{6{,}28.1000.1000^2} = 0{,}16 \ \mu F/\text{kVAR}.$$

Dând diferite valori frecvenței f și tensiunii U, alcătuim tabloul Nr. 8, iar rezultatele sunt reprezentate prin curbele din figura 16.

TABLOUL Nr. 8

Capacitatea în μF/kVAR pentru diferite frecvențe și tensiuni

U_V \ f_{Hz}	50	100	500	1000
100	320	160	32	16
300	35,5	17,8	3,55	1,78
500	12,8	6,4	1,28	0,64
1000	3,2	1,6	0,32	0,16
1500	1,42	0,71	0,142	0,071

Pentru a putea îmbunătăți factorul de putere k = 0,06 al instalației de 1000 kW și pentru a-l aduce la unitate, am văzut că este necesară o putere reactivă de 16.600 kVAR. Capacitățile care trebue utilizate se vor calcula înmulțind această cifră cu valorile corespunzătoare din tabloul Nr. 8, în funcție de frecvența și tensiunea la care va funcționa receptorul considerat.

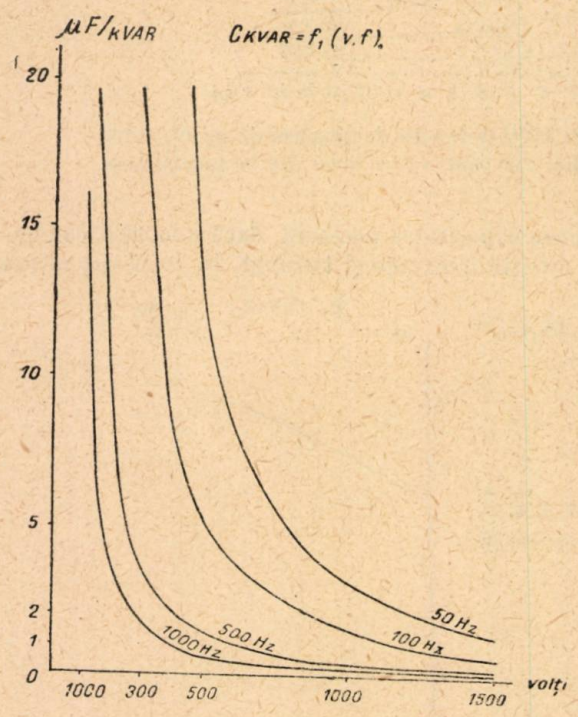

Fig. 16. — Valoarea capacității în μF pe kVAR la diferite frecvențe și tensiuni.

CONCLUZII

Din expunerea făcută putem trage următoarele concluzii: Ameliorarea factorului de putere se poate face cu condensatori statici sau sincroni. Alegerea uneia sau alteia dintre aceste două posibilități depinde de cheltuelile de investiție și de exploatare care rezultă în ipoteza că din punct de vedere tehnic nu s'ar impune unul din aceste sisteme în cazul particular care se examinează.

Cu ajutorul relațiilor stabilite în acest studiu și în funcție de valorile atribuite diferiților parametri, putem ști care soluție este mai avantajoasă.

Din punctul de vedere al siguranței în exploatare, se poate afirma, în stadiul actual al tehnicii, că ambele alternative sunt echivalente.

In încheiere, se face o aplicație numerică trasându-se diferite curbe între parametrii întâlniți în cursul expunerii. S'a ales un exemplu în care factorul de putere este foarte scăzut. S'ar putea spune că este un caz limită, pentru ca diferențele dintre sisteme să iasă mai bine în evidență. In mod absolut analog se conduc calculele pentru oricare ar fi valoarea ce s'ar da factorului de putere k.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе приводится технико-экономическое исследование для улучшения коэффициента мощности электросиловых установок.

Рассматривается сравнительно, с точки зрения технической и экономической, режим работы статических конденсаторов и синхронных моторов, причем принимаются в соображение все элементы, позволяющие вывести те или иные заключения.

Выбор одной или другой системы зависит от величины капиталовложения и расходов по эксплоатации, если технические соображения не требуют и не исключают ни одного из способов решения вопроса.

Устанавливаются соотношения, с помощью которых можно исследовать, какое из решений более благоприятно, в зависимости от разных параметров, трат на капиталовложение, эксплоатацию, длительность и т. д.

Бесперебойность в работе одинакова для обеих систем.

В заключении рассматривается пример, в котором коэффициент мощности весьма мал. При этом рассматриваются различные кривые в связи с параметрами, встречающимися во время изложения.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Улучшение коэффициента мощности с конденсаторами в деривации.

Рис. 2. — Улучшение коэффициента мощности с конденсаторами в деривации, когда снабжение производится при помощи трансформатора.

Рис. 3. — Диаграммы функционирования в случае рисунка 2 только с конденсатором B.

Рис. 4. — Улучшение коэффициента мощности с конденсатором с последовательным включением.

Рис. 5. — Диаграмма монтажа рисунка 4.

Рис. 6. — Улучшение коэффициента мощности с конденсаторами, установленными в деривации при помощи трансформатора.

Рис. 7. — Улучшение коэффициента мощности с конденсаторами, установленными с последовательным включением при помощи трансформатора.

Рис. 8. — Улучшение коэффициента мощности с последовательно включенными конденсаторами при помощи трансформатора.

Рис. 9. — Вариация $\gtrless \frac{P_r}{P_a} = \operatorname{tg} \varphi$ в зависимости от φ.

Рис. 10. — Определение благоприятных областей для статистических или синхронных конденсаторов в зависимости от ρ.

Рис. 11. — Вариация N (годы) в зависимости от ρ.

Рис. 12. — $h = f(p_k)$, число часов функционирования в зависимости от цены kWH, p_k для различных величин отношения ρ и N (годы).

Рис. 13. — $p_k = f(\rho)$, цена на kWH, в зависимости от отношения ρ при $h = 4000$ часов работы.

Рис. 14. — $p_k = f(N)$ на kWH в зависимости от N (годы) для различных величин отношения ρ и для $h = 4000$ часов функционирования.

Рис. 15. — $\rho_N = f\,(N = a_c)$, отношение ρ в зависимости от $N = a_c$ (годы) для $h = 4000$ часов функционирования и $p_k = 1$ лею/kWH.

Рис. 16. — Значение мощности в μF на kVAR при различных частотах напряжения.

ÉTUDE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE POUR L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

(RÉSUMÉ)

On expose dans cet article une étude technique et économique pour l'amélioration du facteur de puissance d'une installation électrique.

On examine d'une manière comparative, aux points de vue technique et économique, le comportement des condensateurs statiques et des moteurs synchrones surexcités, en tenant compte de tous les éléments permettant des conclusions.

Le choix d'un systéme, ou de l'autre, dépend des fonds investis et des dépenses exigées par l'exploitation, en admettant que des considérations d'ordre technique ne viennent imposer ou exclure l'une de ces solutions.

On établit des relations permettant de chercher la solution la plus avantageuse, en fonction des différents paramètres: fond investis, dépenses d'exploitation, durée, etc.

Les deux systèmes sont équivalents quant aux conditions de leurs fonctionnements.

Pour finir, on traite un exemple dans lequel le cos φ est fort réduit. A cette occasion, on trace différentes courbes entre les paramètres que l'on a rencontrés au cours de l'exposé.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Amélioration du facteur de puissance à condensateurs en dérivation.

Fig. 2. — Amélioration du facteur de puissance à condensateurs en dérivation, lorsque l'alimentation est faite au moyen d'un tranformateur.

Fig. 3. — Diagramme du fonctionnement pour le cas de la figure 2 un seul condensateur (B).

Fig. 4. — Amélioration du facteur de puissance à condensateur en série.

Fig. 5. — Diagramme du montage de la figure 4.

Fig. 6. — Amélioration du facteur de puissance à condensateurs montés en dérivation (à l'aide du transformateur).

Fig. 7. — Amélioration du facteur de puissance à condensateurs montés en série (à l'aide du transformateur).

Fig. 8. — Amélioration du facteur de puissance à condensateurs en série, montés sur un autotransformateur.

Fig. 9. — La variation $>\!-\!<\dfrac{P_r}{P_a} = \operatorname{tg}\varphi$ en fonction du $\cos\varphi$.

Fig. 10. — Détermination des régions favorables pour des condensateurs statiques ou synchrones, en fonction de ρ.

Fig. 11. — Variation de N (années) en fonction de ρ.

Fig. 12. — $h = f\,(p_k)$, nombre d'heures de fonctionnement en fonction du prix par kWH, p_k pour différentes valeurs du rapport ρ et du nombre d'années N.

Fig. 13. — $p_k = f\,(\rho)$, prix par kWH, en fonction du rapport ρ, pour $h = 4000$ heures de fonctionnement.

Fig. 14. — $p_k = f(N)$, prix par kWH en fonction du nombre d'années N pour les différentes valeurs du rapport ρ et pour $h = 4000$ heures de fonctionnement.

Fig. 15. — $\rho_N = f(N = a_c)$; le rapport ρ en fonction du nombre d'années $N = a_c$, pour $h = 4000$ heures de fonctionnement et $p_k = 1$ leu/kWH.

Fig. 16. — Valeur de la capacité en μF par kVAR pour différentes fréquences et tensions.

BIBLIOGRAFIE

1. C. Budeanu, *Puteri reactive şi fictive.* Bucureşti, 1927.
2. A. A. Glazunov, *Reţelele sistemelor electrice.* Ed. Tehnică, Bucureşti, 1951.
3. B. Gurevici, Bul. Energetic, 1952, Aprilie, p. 27—30.
4. L. V. Litvac, *Problemele ameliorării factorului de putere în întreprinderile industriale.* Ed. Energetică de Stat, Bucureşti. 1952.
5. B. Pavlovschi, Caiet selectiv, Electrificare şi Electrotehnică, I.D.T., 1952, Nr. 5—6. p. 75—90.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

NOTE

ASUPRA ECHILIBRORILOR FĂRĂ TRANSFORMATOR DE LINIE, ASOCIAŢI REPETORILOR VOCALI DIN CIRCUITELE TELEFONICE

DE

P. POSTELNICU

Intr'o lucrare anterioară [1]) s'a propus o metodă economică pentru a se realiza echilibrorii asociaţi repetorilor vocali din circuitele telefonice. Această metodă elimină transformatorul de linie din echilibror, înlocuindu-l cu o bobină de inductanţă şi o rezistenţă, montate în serie cu simulatorul liniei. Echilibrorul rezultat are în cazul liniilor omogene forma din figura 1 şi îl vom denumi în cele ce urmează echilibror cu inductanţă.

In completarea lucrării anterioare, ne propunem ca în această lucrare să analizăm, din punct de vedere tehnic şi economic, metoda propusă, în comparaţie cu metoda recomandată de Comitetul Consultativ Internaţional de Telefonie [2]).

Transformatorul de linie, nefiind perfect, modifică impedanţa la intrarea liniei. In domeniul frecvenţelor transmise, această modificare este datorită în deosebi fluxului de scăpări, după cum s'a arătat în lucrarea citată [1]), care face ca la frecvenţele cele mai înalte, componenţa imaginară să devină pozitivă. In Anexa C.C.I.F. [2]) se spune că această componentă este greu de echilibrat, acest lucru trebuind să fie însă interpretat în sensul că această componenţă nu poate fi echilibrată în cazul în care se foloseşte structura clasică de echilibror (fig. 2). Structura propusă de noi (fig. 1) permite echilibrarea perfectă a acestei componente. Metoda recomandată de C.C.I.F. constă în a compensa reactanţa pozitivă introdusă de fluxul de scăpări prin conectarea în derivaţie pe linie a unui condensator C′ (fig. 2) de valoare mică (cca 0,01 μF).

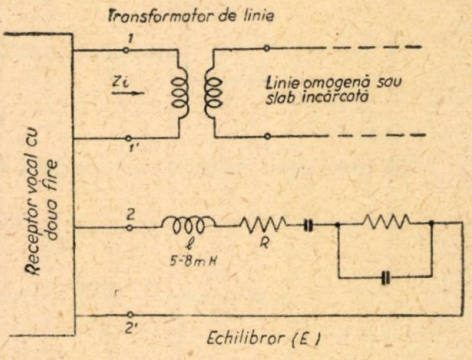

Fig. 1

Pentru a face o comparaţie între cele două metode, este necesar să analizăm efectul introducerii condensatorului C'.

In domeniul frecvenţelor vocale transmise, impedanţa la intrare a liniei omogene, la bornele 1 — 1′ (fig. 2) este egală cu aceea a echilibrorului din figura 1, cu bornele 2 — 2′. Reactanta $j\omega l$, datorită fluxului de scăpări, intervine sensibil la frecvenţele mai înalte din banda vocală (peste 1000 Hz).

---

[1]) P. Postelnicu, Studii şi Cercetări de Energetică, t. II, Nr. 3—4, 1952, p. 45.

[2]) C.C.I.F., *XV-e Assemblée plénière*. Paris, 1949. Annexes au Tome III, p. 31.

In acest domeniu de frecvenţă, impedanţa la intrare a liniei aproximativ egală cu a echilibrorului E', poate fi exprimată sub forma

$$Z_i = R + j\omega l - \frac{j}{\omega C}. \tag{1}$$

Impedanţa la intrare $Z'i$ a liniei la bornele $3 - 3'$ ale repetorului vocal, în cazul că se conectează condensatorul C' (fig. 2), fiind egală cu cea a dipolului $3 - 3'$ din figura 3, va avea în domeniul frecvenţelor înalte expresia

$$Z_i' = \frac{\dfrac{Z_i}{j\omega C'}}{Z_i + \dfrac{1}{j\omega C'}} = \frac{\dfrac{1}{j\omega C'}\left(R + j\omega l + \dfrac{1}{j\omega C}\right)}{R + j\omega l + \dfrac{1}{j\omega C} + \dfrac{1}{j\omega C'}}. \tag{2}$$

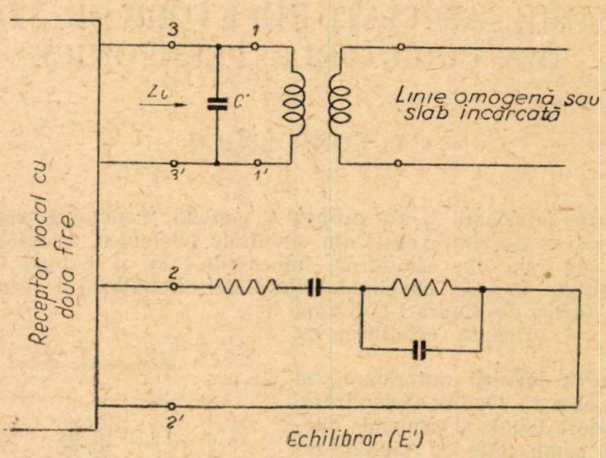

Fig. 2

La frecvenţele înalte putem neglija termenul $\frac{1}{j\omega C'}$ dela numitor şi, ţinând seama că

$$\frac{1}{\omega C'} \gg R + j\omega l,$$

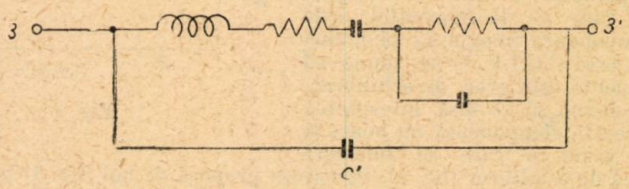

Fig. 3

putem scrie:

$$Z_i = \frac{\dfrac{1}{j\omega C'}\left(R + j\omega l + \dfrac{1}{j\omega C}\right)}{\dfrac{1}{j\omega C'}[1 + j\omega C'(R + j\omega l)]} \sim \tag{3}$$

$$\left(R + j\omega C - \frac{j}{\omega C}\right)(1 - j\omega C' R + \omega^2 C' l) = R + j\omega l - \frac{j}{\omega C} - j\omega C' R +$$

$$+ 2\omega^2 l C' R + j\omega^3 C' l^2 - \frac{C'}{C}(R + j\omega l).$$

In cazul că avem

$$\omega l \ll R,$$

ţinând seama de valorile practice ale lui C şi C', rezultă

$$Z_i = R + j\omega l - \frac{j}{\omega C} - j\omega C'R^2.$$

Se observă că datorită capacităţii C', apare o reactanţă negativă $-j\omega C'R^2$, care poate compensa reactanţa pozitivă $j\omega l$, cu condiţia ca

$$C'R^2 = \omega l, \tag{4}$$

din care rezultă valoarea capacităţii C'

$$C' = l/R^2. \tag{5}$$

In cazul că avem, de exemplu, $l = 5.10^{-3}$ H, rezultă

$$C' = 1{,}4 \cdot 10^{-2}\ \mu\text{F}.$$

In cazul că nu putem considera $\omega l \ll R$, impedanţa la intrare a liniei va avea, conform relaţiilor (3) şi (4), valoarea

$$Z_i' = R - \frac{j}{\omega C} + 2\omega^2 l C'R, \tag{6}$$

ceilalţi termeni fiind neglijabili.

Din (6) rezultă că introducerea condensatorului C', înafară de compensarea reactanţei $j\omega l$, are ca urmare apariţia în expresia impedanţei la intrare a unei componente reale $2\omega^2 l C'R$.

Această componentă nu poate fi echilibrată şi ea micşorează efectul urmărit prin introducerea capacităţii C', în măsura raportului dintre această componentă şi componenta compensată $j\omega l$. Efectul este nul în cazul când acest raport este egal cu unitatea.

Raportul dintre componenta reală $2\omega^2 l C'R$, care apare prin introducerea condensatorului C', şi componenta $j\omega l$, care dispare, este ca modul, $2\omega l/R$. In cazurile practice, avem în general $l = 4 \div 8$ mH, $R = 300 \div 800\ \Omega$. La frecvenţa $f = 2800$ Hz, considerând $l = 6$ mH şi $R_1 = 600$ (linii aeriene), $R_2 = 300$ (cabluri foarte slab încărcate), rezultă

$$2\omega l/R_1 = 0{,}35; \quad 2\omega l/R_2 = 0{,}70.$$

Din cele de mai sus, rezultă că introducerea condensatorului C' are un efect limitat asupra îmbunătăţirii echilibrării, în cazul că transformatorul de linie lipseşte de pe ramura echilibrorului. Metoda recomandată de C.C.I.F. nu este deci indicată în cazul când avem nevoie de o atenuare de echilibrare mare (circuite lungi) şi în deosebi, în cazul circuitelor în cablu foarte slab încărcate, la care R este mic şi atenuarea de echilibrare necesară, mare, şi al celor slab încărcate, la care componenta reală R prezintă deja o creştere defavorabilă echilibrării la frecvenţele înalte. De asemenea, această metodă nu poate fi aplicată în cazul circuitelor vocale de calitate superioară, la care banda de frecvenţă depăşeşte 3000 Hz şi al circuitelor în cablu încărcate greu sau mijlociu.

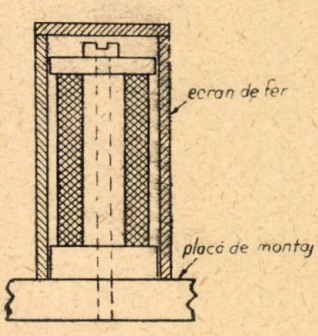

Fig. 4

Rezultatele teoretice obţinute mai sus concordă cu rezultatele practice. Astfel, cu ajutorul echilibrorului cu inductanţă, s'a obţinut pentru un circuit în cablu foarte uşor încărcat o atenuare de echilibrare în banda 250—3500 Hz de 32—34 db, pe când cu metoda recomandată de C.C.I.F. numai cca 26 db, în banda 250—3000 Hz.

Un alt desavantaj — de mai mică importanţă — al metodei recomandate de C.C.I.F. îl formează introducerea, odată cu condensatorul C', a unei uşoare distorsiuni de atenuare.

Trecând la aspectul economic al problemei, observăm că cele două soluţii economisesc un transformator de linie şi introduc, în schimb, o bobină de inductanţă de 4—8 mH şi a doua un condensator de cca 0,01—0,02 μF. Costul acestor două elemente este neglijabil faţă de cel al transformatorului de linie. Costul bobinei este însă mai mic decât al con-

densatorului, deoarece inductanţa acesteia este mai mică şi nu se impune nicio condiţie de calitate. Bobina de inductanţă fiind în serie cu o rezistenţă de 300—600 Ω, se poate realiza cu un singur element atât bobina cât şi parte din rezistenţă, dacă acesta din urmă se bobinează inductiv pe un suport de ceramică sau alt material convenabil şi circuitul magnetic se realizează cu ajutorul şurubului de fier care fixează rezistenţa pe placa de montaj şi al unui cilindru ecran, ca în figura 4.

Pe baza analizei de mai sus şi a încercărilor practice, credem că soluţia echilibrorului cu inductanţă este mai avantajoasă decât cea recomandată de C.C.I.F., atât din punct de vedere economic, cât şi tehnic, în deosebi atunci când se cere o echilibrare de calitate superioară, necesară pentru a avea posibilitatea folosirii unui repertor cu amplificare mare şi a asigura în acelaşi timp şi stabilitatea circuitului.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul III, 1953

ÎN LEGĂTURĂ CU ARTICOLUL SOLUŢII STAŢIONARE A UNOR ANUMITE ECUAŢII DIFERENŢIALE NELINIARE DE N. MINORSCHY

DE

M. MARINESCU

Spre a ilustra printr'un exemplu concret progresele realizate la noi în ţară în procesul creaţiei ştiinţifice, ca urmare a regimului nostru de democraţie populară şi a însuşirii de către cercetătorii noştri a metodelor de lucru a oamenilor de ştiinţă sovietici, vom examina unele din rezultatele şi realizările obţinute de Institutul de Energetică al Academiei R.P.R. în problema «pendulului parametric», comparând aceste rezultate cu unele cercetări ce se fac în ultimul timp, în aceeaşi problemă, în apus, unde după cât se pare, aceste cercetări au dat loc la numeroase şi ample discuţii.

Incă din anul 1950, colectivul care se ocupă în Institutul nostru cu problema maşinilor electrice de tip parametric a ajuns la ideea posibilităţii autoexcitării sistemelor electromagnetice parametrice prin curent alternativ, ca urmare a desvoltării teoriei şi aplicaţiilor acestor maşini şi a lucrării publicate în anul 1951, *Studiul regimurilor de funcţionare cu viteză variabilă la motorul monocircuit, funcţionând pe baza variaţiei inductanţei proprii* [1]).

In scopul de a verifica pe cale experimentală acest efect prevăzut de noi prin teorie s'a pus în construcţie în atelierul Institutului de Energetică, în anul 1950, un pendul parametric cu condensator, primul de acest gen apărut în tehnică şi a cărui funcţionare a verificat întocmai existenţa noului fenomen, căruia i s'a dat prin teoria elaborată ulterior o fundamentare teoretică temeinică bazată pe lucrarea *O nouă metodă de analiză a fenomenelor parametrice* [2].

In această lucrare se abordează fenomenele parametrice pe baza analizei armonice, iar parametrii sistemului de ecuaţii care defineşte curenţii sunt mărimi fizice. Această metodă, analogă cu metodele utilizate în electrotehnica clasică, permite imediata interpretare fizică a relaţiilor stabilite, spre deosebire de metodele pur matematice utilizate astăzi în studiul fenomenelor parametrice care, din cauza schimbărilor numeroase de variabile şi a introducerii coeficienţilor fără dimensiuni fizice, nu permit acest lucru cu uşurinţă.

Eficacitatea metodei a fost exemplificată şi prin rezolvarea problemei oscilaţiilor pendulului în curent alternativ, limitând curenţii din spectru la numai 3 (metoda celor

[1]) M. Marinescu şi P. Postelnicu, Comunicările Acad. R.P.R., t. I, Nr. 7, 1951, p. 617.

[2]) M. Marinescu şi M. Popov, Comunicările Acad. R.P.R., t. II, Nr. 9—10, 1952, p. 615.

3 curenţi), în care caz ea ne-a dat relaţia de frecvenţă şi relaţia de amplitudine a oscilaţiilor, condiţiile necesare pentru întreţinerea acestor oscilaţii, precum şi modul cum depind ele de diferiţii parametrii ai sistemului. Intre altele a apărut şi efectul cu totul deosebit al introducerii condensatorului în circuit, care schimbă aspectul fenomenului.

In urma cercetărilor în curs, se întrevede astăzi pentru economia ţării noastre posibilitatea unor aplicaţii deosebit de importante bazate pe efectele obţinute prin introducerea condensatorului în circuit.

Să examinăm acum unele cercetări întreprinse în ultimul timp în apus, în legătură cu un pendul asemănător, cercetări publicate în Iulie 1952, deci cu un an în urma celor publicate la noi, în articolul *Soluţii staţionare a unor anumite ecuaţii diferenţiale neliniare*[1]).

Acest studiu comparativ este instructiv, întrucât ne arată, într'un caz concret, superioritatea metodei de lucru în cercetarea ştiinţifică dela noi, care, prin rezultatele obţinute poate depăşi astăzi cu mult, în unele sectoare, rezultatele obţinute în apus.

Astfel, în lucrarea sa, autorul american studiază cazul cu mult mai simplu al pendulului fără condensator. In acest caz oscilaţiile pendulului nu depăşesc cca 12°. In cazul nostru pendulul poate depăşi cu uşurinţă 180°, transformându-se în motor parametric în regim de funcţionare cu « viteza variabilă », studiat de noi anterior — în lucrarea citată.

De aceea şi teoria primului caz este mult mai simplă, putându-se aplica metoda cunoscută în analiza matematică sub denumirea de « metoda parametrului mic », pe care de altfel o aplică şi autorul american în lucrarea sa. După cum am arătat la început, se adoptă astfel calea metodei matematice pure, cu frecvente schimbări de variabile şi cu introducerea coeficienţilor fără dimensiuni fizice.

Caracteristic este faptul că rezultatele la care se ajunge în acest caz mai simplu, prin această metodă, nu sunt totuşi satisfăcătoare, întrucât ea nu permite calculul amplitudinii şi frecvenţei oscilaţiilor, a dependenţei acestora de parametrii sistemului, ci numai unele condiţii suficiente pentru existenţa şi stabilitatea oscilaţiilor. De asemenea, concluziile la care se ajunge sunt în contrazicere cu experienţa, după cum se va vedea mai departe. Se pot aduce astfel lucrării următoarele obiecţii:

1. Ecuaţia (14.1) din text, anume

$$\ddot{\theta} + b'\dot{\theta} + \Omega^2\theta + e'\theta^3 + (a' + c'\theta^2)\ \theta \cos 2\ \Omega t = 0,$$

în care θ este unghiul de oscilaţie al pendulului, iar b', Ω, e', a', c' nişte parametri fără semnificaţie fizică, funcţii ei însăşi de curenţi şi de amplitudinea θ_0 a mişcării, nu ne poate da mişcarea decât prin aproximaţii succesive, deoarece, după cum am spus, parametrii sunt ei însăşi funcţii implicite de θ_0. In acest caz este practic imposibil de a se aprecia influenţa parametrilor fizici ai circuitului (*RLC*) şi de a se obţine mişcarea (amplitudinea şi frecvenţa) în mod explicit. Singurul lucru care se obţine aici este numai o condiţie suficientă pentru existenţa unei oscilaţii stabile ceea ce din punct de vedere practic reprezintă foarte puţin, deoarece noi constatăm experimental că această oscilaţie există. Este mult mai important să putem determina amplitudinea şi frecvenţa oscilaţiilor şi modul cum ele variază cu *RLC* şi *E*, precum şi condiţia necesară întreţinerii acestei oscilaţii. Lucrul acesta este însă posibil prin metoda pusă la punct în lucrările noastre.

2. Ca o consecinţă a celor de mai sus, apare următoarea contrazicere: dacă se pleacă dela ecuaţiile

$$L(\theta) = L_0 - \alpha_2\theta^2 - \alpha_4\theta^4 \qquad (12.1)$$

$$\theta = \theta_0 \cos \Omega t \qquad (12.4)$$

---

[1]) N. Minorschy, Journal of the Franklin Institute, Iulie, 1952, p. 21.

şi se ia ca soluţie a curenţilor, în urma aproximaţiilor făcute, expresiile (12.4), deci dacă raportul curenţilor din spectru este o cantitate reală, astfel cum se vede din aceste expresii, rezultă că, în acest caz, după cum am arătat în lucrările noastre,

$$\frac{1}{2}\int idl = 0$$

şi deci pendulul nu se întreţine. Deci dacă există o stare staţionară, aceasta este zero. Această contrazicere se explică prin aceea că soluţia ecuţiei (14.1) nu este $\theta = \theta_0 \cos \Omega t$. Ca urmare nici soluţia curenţilor nu este expresia (12.4) şi deci concluzia la care se ajunge pe baza acestor soluţii nu este justă.

3. Oscilaţiile care se observă experimental în cazul fără condensator, deci în cazul pendulului american, sunt sincrone, submultiplii impari ai frecvenţei forţei electromotoare, şi acest lucru scapă teoriei autorului american, în care oscilaţiile sunt asincrone. Deci, şi din acest punct de vedere ecuaţia stabilită în lucrarea sa nu corespunde realităţii.

Noi am arătat însă că, într'un sistem parametric, pe lângă travaliul asincron, datorit interacţiunii a doi curenţi consecutiv din spectru, apare şi un travaliu sincron, datorit interacţiunii ai doi curenţi neconsecutivi din acelaşi spectru, atunci când frecvenţa oscilaţiilor este un submultiplu întreg al frecvenţei forţei electromotoare.

Acest travaliu poate exista şi atunci când raportul curenţilor este real. El este deci acela care apare în pendulul fără condensator. In cazul pendulului cu condensator, dimpotrivă apare travaliul asincron, prin defazajul introdus între curenţi.

Din această succintă analiză, bazată atât pe considerente teoretice, cât şi pe experienţă, rezultă că teoria autorului american nu corespunde realităţii, ea având un caracter formal.

Vedem că, chiar atunci când este vorba de probleme ştiinţifice delicate, de fenomene noi, care deschid noi drumuri în ştiinţă şi în tehnică, cercetările care se fac la noi pot să devanseze astăzi, atât ca rezultate teoretice, cât şi ca rezultate practice, pe acelea ce se fac în apus.

Această constatare sporeşte încrederea pe care trebue să o avem în eficacitatea muncii pe care o depunem în cadrul cercetărilor ştiinţifice.

DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ PE ANUL 1952

Institutului de Energetică, una din realizările regimului nostru de democraţie populară, îi revine sarcina de mare răspundere de a rezolva problemele ştiinţifice legate de progresul tehnic al energeticii în ţara noastră, pentru construirea bazei materiale a socialismului. Conţinutul activităţii acestui Institut îl formează efectuarea cercetărilor cu privire la valorificarea resurselor noastre energetice, alimentarea cu energie a diferitelor ramuri ale economiei naţionale în condiţii optime, studiul utilizării diferitelor forme de energie.

In anul 1952, Institutul de Energetică a avut ca îndreptar permanent în munca sa Hotărîrea Sesiunii Generale Ştiinţifice a Academiei Republicii Populare Române din Martie 1952 care, analizând lipsurile generale ale activităţii ştiinţifice din ţara noastră, a apreciat că cercetătorii nu şi-au pus încă cu curaj în faţă sarcina rezolvării unora dintre problemele mari legate de desvoltarea forţelor productive ale ţării, de sprijinirea mai activă a marilor construcţii ale socialismului.

Punându-şi în mod hotărît problema orientării cercetărilor spre marile probleme, energetice ridicate de construcţia socialismului, străduindu-se să îndrepte lipsurile constatate în urma analizei activităţii pe anul 1951 — articolul Academicianului I. S. Gheorghiu, apărut în Scânteia din 8 Martie 1952 — şi a discuţiilor care au urmat Institutul de Energetică a reuşit în mare măsură să aducă o contribuţie însemnată pentru economia naţională, în domeniul reţelelor electrice, al îmbunătăţirii randamentului termic al întreprinderilor, al termoficării, al acţionărilor electrice, al studiului combustibilor.

Infiinţarea unei secţii de energetică generală, pe baza Hotărîrii Prezidiului Academie R.P.R. din 12 Iulie 1952 constitue de asemenea un pas înainte în ceea ce priveşte preocuparea faţă de problemele complexe tehnico-economice ale energeticii.

Vom arăta în cele ce urmează principalele probleme pe care şi le-a pus Institutul de Energetică şi modul cum ele au fost rezolvate în cursul anului 1952.

1. *Studiul îmbunătăţirii randamentelor termice în industria siderurgică* (colectiv: Ing. A. Sinescu, Ing. G. Eggy).

S'a rezolvat cu succes problema utilizării gazului de furnal la prăjitoarele de minereu. Inlocuirea prafului de cocs şi a prafului de cărbune, utilizate până acum la aceste cuptoare, prin gaz de furnal, căruia nu i se dădea nicio utilizare, va aduce o importantă economie, o mărire a productivităţii cuptoarelor adaptate pentru arderea gazului de furnal, îmbunătăţirea calităţii produsului prin eliminarea cenuşii datorite cocsului, precum şi schimbarea radicală a condiţiilor de muncă, prin eliminarea completă a gazelor nocive. Concluziile obţinute pe baza calculelor şi a încercărilor de laborator au fost aplicate în practică — lucrându-se în strânsă colaborare cu muncitorii şi tehnicienii din producţie — şi au fost confirmate întru totul de rezultatele obţinute la scară industrială.

2. *Studiul problemei termoficării.*

Producerea combinată de energie electrică şi calorică, care constitue una din cele mai importante realizări ale energeticii sovietice — prin importanţa economiilor de combustibil pe care le realizează — a luat o mare extindere şi în tematica Institutului de Ener-

getică, ținând seama de interesul deosebit pe care îl prezintă aplicarea termoficării în țara noastră. Institutului i-a revenit sarcina de a furniza datele necesare pentru alegerea soluțiilor celor mai avantajoase — ținând seama de condițiile climaterice și economice specifice țării noastre—precum și de a soluționa unele cazuri concrete, ca model de rezolvare a unor astfel de probleme.

In acest scop au fost studiate două exemple concrete de termoficare și anume: un caz de încălzire prin termoficare a unui cartier dintr'un mare oraș și un caz de termoficare mixtă (industrială și urbană) a unui centru industrial. Prin alegerea a două cazuri tipice, cu regimuri de temperatură caracteristice pentru câte o întreagă regiune a țării, aceste lucrări reprezintă o contribuție pentru rezolvarea principială a problemei termoficării în R.P.R. și totodată pentru opera de reconstrucție socialistă a orașelor, în spiritul Hotărârilor Consiliului de Miniștri al R.P.R. și ale Comitetului Central al P.M.R. din 13 Noembrie 1952.

Tot în cadrul problemei termoficării au fost realizate diagrame și nomograme, relative la puterea electrică care se poate obține prin destinderea aburului între diferite presiuni inițiale și contrapresiuni folosite în termoficare și care permit ca, în diferite cazuri concrete, să se calculeze cu ușurință rezultatele care se pot obține prin termoficare și să se aleagă soluția cea mai avantajoasă din punct de vedere tehnico-economic.

Pentru predeterminarea cazurilor în care este avantajos să se aplice termoficarea, precum și pentru a putea stabili un criteriu energetic în amplasarea industriilor, au fost stabiliți indici de consum de căldură — pentru încălzit și pentru scopuri tehnologice — pentru diferite ramuri industriale și diferite tipuri de centre urbane.

S'au relevat prin contribuția adusă în problema termoficării tovarășii Ing. I. Stăncescu, Ing. I. Badea, Ing. A. Mișu, Ing. V. Nahmias, Ing. C. Goldenberg.

3. *Studiul de protecție împotriva supratensiunilor.*

Pentru lămurirea supratensiunilor periculoase de origine internă, conducând la defecte multiple în rețelele cu neutrul izolat, în cazul punerii la pământ a unei faze — fenomen pentru care nu există o explicație mulțumitoare—Ing. P. Dimo, ajutat de Ing. Fl. Manea și Ing. E. Potolea au elaborat o nouă teorie care permite predeterminarea supratensiunilor posibile, în funcție de condițiile de exploatare a sistemului electric dat. Această teorie, care a fost confirmată de calculele efectuate asupra câtorva cazuri reale, reprezintă o contribuție importantă în cunoașterea unei surse curente de defecte și întreruperi în rețelele electrice și posibilitatea de a preîntâmpina aceste defecte.

In problema supratensiunilor de origine atmosferică, care reprezintă de asemenea o sursă curentă de avarii în rețelele electrice, Institutul de Energetică a adus o importantă contribuție colaborând pentru rezolvarea acestei probleme cu Ministerul Energiei Electrice și Industriei Electrotehnice.

4. *Studiul unor tipuri de mașini electrice.*

In această problemă s'au elaborat principii de calcul și norme de proiectare pentru arborele electric. Lucrarea prezintă o deosebită importanță practică pentru marile șantiere ale socialismului, având diferite aplicații și în deosebi pentru acționarea ecluzelor.

Prof. M. Marinescu a adus noi contribuții științifice în teoria mașinilor electrice cu inductanță variabilă și de asemenea a fost elaborată de Ing. M. Popov o nouă metodă de calcul a circuitelor electrice, lucrare originală, valoroasă atât din punct de vedere matematic, cât și prin simplificarea pe care o aduce în calculele practice.

Tot în cursul anului 1952, s'au mai efectuat studii într'o serie de probleme privind funcționarea rețelelor electrice și proiectarea acestora, randamentele energetice în industrie, studiul combustibililor din R.P.R., folosirea rațională a combustibililor etc.

Institutul de Energetică a contribuit la realizarea planului de standardizare, elaborând trei proiecte de standarde.

In afară de colaborarea cu întreprinderile industriale, cu Institutele de Proiectare şi cu M.E.E.I.E., pentru rezolvarea problemelor din planul de lucru, colectivele de cercetători ai institutului au dat consultaţii la faţa locului unui număr de şase întreprinderi, într'o serie de probleme locale ridicate de aceste întreprinderi. Astfel, în rezolvarea problemelor legate de termoregulatori pentru cuptoare electrice, frâne electrodinamice, generatori de sudură, dispozitive de prevenire a accidentelor la prese şi ghilotine, dispozitive pentru montarea scuturilor pe rulmenţi etc.

De asemenea, s'a dat ajutor diferitelor ministere şi instituţii prin efectuarea analizelor de cărbuni necesare pentru rezolvarea unor probleme imediate.

Institutul de Energetică şi-a dat concursul şi la consfătuirile cu stahanoviştii şi fruntaşii în producţie, organizate în cinstea zilei de 7 Noembrie de către Casa Oamenilor de Ştiinţă împreună cu Consiliul Central al Sindicatelor, în problema posibilităţilor de înlocuire a materialelor neferoase în electrotehnică, şi a recuperării pierderilor de căldură dela cuptoarele metalurgice.

Tot în anul 1952 s'a început colaborarea cu Institutul de Matematică al Academiei R.P.R., prin studierea de către cercetătorii celor două institute a câtorva probleme de electrotehnică cuprinzând aspecte matematice încă nerezolvate.

Experienţa câştigată a dovedit că institutul poate aduce un ajutor eficace prin colaborarea cu întreprinderile industriale şi că, urmând exemplul cercetătorilor sovietici, se impune o lărgire şi o adâncire a acestei colaborări. In ceea ce priveşte colaborarea cu alte institute ştiinţifice, rezultatele parţiale obţinute în anul 1952 au arătat că ea poate constitui un real ajutor pentru rezolvarea unor probleme tehnice necesitând, calcule matematice complicate (de exemplu: în problema maşinilor electrice cu inductanţă variabilă, problema încălzirii în fenomenele electrice etc.). Această colaborare constitue un ajutor pentru ridicarea nivelului ştiinţific al lucrărilor Institutului de Energetică şi, totodată, contribue la îndreptarea lucrărilor matematice pe făgaşul legăturii cu practica.

Atât în orientarea cercetărilor şi în organizarea muncii ştiinţifice, cât şi în rezolvarea problemelor, principalul ajutor a fost dat de ştiinţa sovietică.

Uniunea Sovietică este singura ţară din lume unde s'a desvoltat o adevărată ştiinţă energetică, nivelul de desvoltare al forţelor de producţie şi caracterul socialist al relaţiilor de producţie constituind o bază materială trainică pentru studierea ştiinţifică a problemelor complexe ridicate de valorificarea şi utilizarea cea mai raţională a surselor de energie, ţinând seama de corelaţiile reciproce între diferitele ramuri şi diferitele aspecte ale economiei naţionale.

Indrumarea cercetărilor, întocmirea planului anual de activitate şi a planului tematic de perspectivă, s'au făcut pe baza cunoaşterii orientării energeticii sovietice, din numeroasele lucrări ale energeticienilor sovietici. Deosebit de preţioase în această direcţie au fost sugestiile primite din partea Academicianului N i c h i t i n cu prilejul vizitei făcute la Institutul de Energetică.

Crearea secţiei de energetică generală, înscrierea în planul institutului a unor probleme ca studiul economisirii de combustibil prin introducerea termoficării, îmbunătăţirea randamentului termic al întreprinderilor, norme de calcul al arborelui electric etc. au urmărit tocmai îndreptarea cercetărilor institutului pe baza concepţiei energetice sovietice şi adaptarea unor realizări sovietice la condiţiile din ţara noastră.

In numeroase cercetări, metodele indicate de literatura sovietică au determinat direcţia dată cercetărilor, de exemplu în studiul supratensiunilor de origine atmosferică, studiul maşinilor electrice cu inductanţă variabilă, studiul cenuşilor cărbunilor din R.P.R. etc. In general, în rezolvarea tuturor problemelor au fost folosite datele şi metodele cuprinse în literatura sovietică de specialitate.

In ceea ce priveşte orientarea, planificarea şi organizarea muncii ştiinţifice, Institutul de Energetică a făcut progrese însemnate faţă de anii trecuţi. Astfel, problema orientării cercetărilor şi a alcătuirii unei tematice de perspectivă — în care să se încadreze planurile anuale de activitate şi pe baza căreia să se facă organizarea institutului, creşterea cadrelor şi desvoltarea laboratoarelor — a fost pe larg desbătută în secţiile institutului, în şedinţele plenare, în şedinţele Consiliului Ştiinţific şi apoi, cu participarea delegaţilor diferitelor departamente, în şedinţele Secţiei a III-a a Academiei R.P.R. Tematica de perspectivă a fost alcătuită pe baza preocupărilor energeticii sovietice şi ţinând seama de cerinţele pe care desvoltarea economiei noastre le pune cercetărilor de energetică.

Discuţiile purtate în problema orientării ştiinţifice au scos la iveală faptul că, institutul preocupându-se aproape numai de aspectele tehnice speciale din domeniul energeticii, a pierdut din vedere problemele mari tehnico-economice ale desvoltării energeticii în R.P.R., ceea ce dovedea insuficienta adâncire a concepţiei energeticii sovietice.

Pentru a remedia această situaţie, Prezidiul Academiei R.P.R. a hotărît înfiinţarea unei secţii de energetică generală în cadrul Institutului de Energetică.

Tot în anul 1952 s'a dat o mai mare desvoltare problemelor de termoenergetică, care în anul 1951 fuseseră lăsate în mod cu totul greşit pe planul al doilea.

La întocmirea planului tematic pe anul 1952, fiecare problemă şi temă care urmă să fie cercetată a fost în prealabil discutată cu reprezentanţi ai departamentelor interesate. Cunoscându-se dela început obiectivele care interesau producţia şi delimitându-se mai precis domeniul de cercetare — prin împărţirea temelor în subteme — planificarea muncii ştiinţifice a fost mai eficace şi controlul acestei activităţi a fost înlesnit.

Pe baza planului anual de cercetări, s'au alcătuit trimestrial planuri detaliate, care au fost discutate în şedinţele plenare ale secţiilor şi apoi aprobate de Consiliul Ştiinţific al Institutului. In cadrul fiecărei teme s'au ţinut Comunicări în şedinţele plenare ale secţiilor (în total 72 de Comunicări în cursul anului), supunându-se desbaterilor atât obiectivul urmărit şi metodele folosite în desfăşurarea cercetărilor, cât şi rezultatele parţiale şi finale obţinute. Fixarea răspunderii individuale, discutarea periodică în colectiv a lucrărilor efectuate, şedinţele de analiză a muncii (lunare în colective, trimestriale în secţii şi pe Institut) au contribuit în mare măsură la îmbunătăţirea muncii şi au permis, în cele mai multe cazuri, sezisarea din timp a lipsurilor şi întârzierilor şi luarea de măsuri pentru remedierea lor.

Consiliul Ştiinţific al Institutului a adus o contribuţie importantă în activitatea Institutului, prin îmbunătăţirile esenţiale aduse în problema tematicii de perspectivă şi prin desbaterea planurilor de activitate trimestriale şi a rezultatelor obţinute, atât din punct de vedere al valorii ştiinţifice a lucrărilor cât şi în privinţa importanţei aplicării lor în practică. Faptul că în prezent Consiliul Ştiinţific cuprinde şi un număr de specialişti din cadrul Academiei R.P.R. precum şi din diferite departamente, îi permite să aibă o vedere de ansamblu mai bună asupra problemelor energetice legate de practica construirii socialismului în ţara noastră.

Nivelul critic al discuţiilor a crescut în cursul anului 1952, dovedindu-se astfel că cercetătorii Institutului îşi dau din ce în ce mai mult seama de ajutorul important pe care îl reprezintă discutarea lucrărilor lor, în spirit critic, că ei înţeleg din ce în ce mai bine că, aşa cum ne învaţă Tovarăşul Stalin, nici o ştiinţă nu se poate desvolta şi nu poate prospera fără lupta de opinii, fără libertatea criticii.

In deosebi, în legătură cu lucrările *Protecţia contra loviturilor directe ale trăsnetului*, *Calculul proceselor de ardere*, *Recuperarea pierderilor de căldură în industria hârtiei*, *Norme de recuperare a pierderilor de căldură în industrie*, discuţiile purtate asupra planului lucrărilor, asupra unor aspecte ce nu fuseseră suficient adâncite, asupra definiţiilor date, au permis autorilor să-şi îmbunătăţească lucrările.

Un factor important pentru bunul mers al cercetărilor a fost lărgirea bazei materiale a Institutului în special prin primirea de aparataj de măsură de mare precizie din Uniunea Sovietică şi ţările de democraţie populară, precum şi prin confecţionarea de dispozitive şi prototipuri în atelierul propriu al Institutului.

In problema cadrelor ştiinţifice, s'a căutat să fie întărite în primul rând colectivele care aveau în sarcină problemele cele mai importante pentru economia naţională.

Institutul a încurajat iniţiativa creatoare a cercetătorilor, cunoscând că aceasta, dacă este just îndrumată spre rezolvarea problemelor practice ale construirii socialismului, constitue elementul principal pentru progresul ştiinţei. O serie de probleme pornite din iniţiativa cercetătorilor Institutului — de exemplul studiul supratensiunilor produse la punerea la pământ a unei faze, studiul încălzirii prin termoficare a unui cartier dintr'un oraş — au condus la realizări originale, primite cu interes de tehnicienii din industrie. Contribuţii originale au adus: studiul unui ciclu original în domeniul utilizării energetice a presiunii gazelor naturale — ciclu lăsând să se întrevadă aplicaţii practice pentru valorificarea unei energii care astăzi se pierde — studiul teoretic al maşinilor electrice cu inductanţă variabilă, lucrările privind constanta de timp a fenomenelor tranzitorii şi încălzirea contactelor liniforme.

In munca Institutului de Energetică au fost antrenate numeroase cadre tinere, acestea formând peste 50% din numărul total al cercetătorilor. Toţi aceşti tineri au primit sarcini în cadrul planului ştiinţific, aducând contribuţii valoroase în rezolvarea problemelor din planul Institutului.

S'au relevat în special tovarăşii Fransua Alex., Moraru Augustin, Potolea Eugen, Manea Florin, Popov Mihai, Constantinescu Emil, Nahmias Virgil, Goldenberg Carol, Epure Ioan.

Cu tot progresul realizat în anul 1952, Institutul de Energetică a avut în activitatea sa şi o serie de lipsuri însemnate. Principala lipsă este faptul că nu a reuşit să ducă la bun sfârşit toate sarcinile ce i-au stat în faţă şi nu se găseşte încă în situaţia de a putea răspunde la întrebările puse de practica cercetării ştiinţifice, în termenele impuse de ritmul construirii socialismului în ţara noastră.

Aceasta se datoreşte în primul rând unor lipsuri care mai dăinuiesc în rândul cercetătorilor. Unii dintre aceştia au depus o activitate insuficientă şi nu au respectat termenele din planul de lucru.

Astfel Ing. C. Penescu, precum şi Ing. Gh. Secară şi Prof. C. Parteni, nu s'au preocupat suficient de respectarea planului de activitate.

Faptul că în numeroase cazuri lucrările nu au fost depuse la timp a făcut adesea ca nici şedinţele de comunicări să nu-şi atingă în întregime scopul, lucrările respective neputând fi studiate şi adâncite.

Unii cercetători au supraîncărcat planul, apreciind greşit posibilităţile de lucru ale colectivului respectiv.

Au fost programate unele probleme fără un studiu suficient în prealabil, de exemplu studiul interdependenţei regulatoarelor de viteză şi de tensiune, la funcţionarea în paralel a centralelor interconectate — problemă mult prea vastă pentru forţele colectivului respectiv şi care a trebuit abandonată.

Unii responsabili de probleme nu au exercitat un control susţinut asupra activităţii colectivului, dar nici cercetătorii nu au menţinut cu ei o legătură strânsă, de exemplu colectivul de supratensiuni de origine atmosferică.

De asemenea, trebue menţionată şi o altă lipsă comună a mai multor cercetători, care nu au planificat din timp materialele pentru executarea diferitelor dispozitive experimentale.

Conducerea Institutului nu a exercitat nici ea întotdeauna un control susţinut al activităţii ştiinţifice. Faptul că a aprobat efectuarea unor lucrări fără un studiu prealabil suficient al volumului lucrării şi al posibilităţilor de realizare, arată că ea nu a verificat îndeajuns felul cum colectivele şi-au planificat activitatea.

O altă greşeală importantă este faptul că nu s'au încheiat contracte de colaborare cu departamentele şi întreprinderile beneficiare ale unor lucrări de plan. In unele cazuri acestea nu au asigurat mijloacele necesare pentru efectuarea lucrărilor, arătând o totală lipsă de interes. Din această cauză, unele probleme importante pentru producţie şi care erau prevăzute în plan nu au putut fi rezolvate. Desigur că nu s'ar fi ajuns la această situaţie, dacă s'ar fi încheiat contracte de colaborare cu întreprinderile respective, fixându-se dela început obligaţiile ce le reveneau acestora.

Conducerea Institutului nu s'a îngrijit suficient de ridicarea pregătirii profesionale a cadrelor tinere, problemă centrală a Institutului.

Deşi s'au luat unele măsuri bune în această direcţie — întocmirea unui plan de studiu individual, îndrumarea tinerelor cadre spre cercurile de ştiinţă şi tehnică organizate de Casa Oamenilor de Ştiinţă — conducerea nu a urmărit în mod sistematic felul în care aceste măsuri au fost puse în practică. Din această cauză, studiul individual, de exemplu, desfăşurându-se fără un control satisfăcător, nu şi-a atins decât în mică măsură scopul.

In activitatea şi metodele de muncă folosite au mai existat şi alte lipsuri. Astfel, deşi în general nivelul critic al discuţiilor a crescut, mai există totuşi sectoare ca de exemplu, secţia de tehnologia combustibililor solizi, care folosesc în foarte mică măsură arma preţioasă a criticii şi autocriticii. Nu întotdeauna critica desfăşurată a reuşit să scoată la iveală lipsurile esenţiale; astfel, discuţiile purtate în secţia electrotehnică s'au oprit uneori la probleme de terminologie, fără a se adânci problemele fundamentale ale lucrării prezentate.

Planul editorial nu a fost realizat decât în proporţie de 50%, din cauză că unii cercetători nu şi-au respectat angajamentele, nepredând lucrările programate, sau au apreciat greşit timpul necesar şi amploarea lucrărilor ce urmau să fie publicate.

De asemenea, nu a fost îndeplinit nici planul de activitate al Consiliului Ştiinţific, din cauza lipsei de continuitate provocate de reorganizările acestuia. In loc să se analizeze activitatea fiecăreia din secţiile Institutului, Consiliul a analizat o singură secţie.

Dacă Institutul de Energetică a avut aceste lipsuri importante în activitatea sa, trebue spus că nici din partea Academiei R.P.R., Institutul nu a primit un sprijin suficient în rezolvarea problemelor sale. Astfel, deşi în cursul anului 1952 au început lucrări de reparaţii la laboratoarele institutului, totuşi tergiversarea acestor lucrări până în Decembrie a făcut ca, în tot acest timp, laboratoarele să fie indisponibile. Aceasta a dus la întârzieri mari în efectuarea lucrărilor experimentale şi deci în definitivarea unei serii de teme importante ale secţiilor de electrotehnică şi maşini termice.

O parte din răspunderea pentru tergiversarea amenajării laboratoarelor revine întreprinderii constructoare, dar nici Academia R.P.R., prin serviciile ei centralizate, nu a urmărit în suficientă măsură lucrarea.

De asemenea, conducerea Academiei R.P.R. nu a sprijinit îndeajuns institutul în obţinerea unui număr suficient de cadre ştiinţifice, ceea ce a constituit o greutate în îndeplinirea planului, în deosebi în problemele de ardere şi de recuperare a pierderilor de căldură. Tot din această cauză, secţia de energetică generală nu a putut începe în anul 1952 o activitate susţinută.

★

Sarcinile mari care revin Institutului de Energetică al Academiei R.P.R., impun ca în anul 1953 toate forţele Institutului să fie mobilizate pentru lărgirea şi adâncirea succeselor obţinute în anul 1952, urmărindu-se cu perseverenţă lichidarea lipsurilor arătate.

Cu sprijinul Academiei R.P.R. şi al departamentelor interesate, va trebui intensificată şi permanentizată colaborarea cu producţia sub toate formele, pentru rezolvarea într'un ritm cât mai rapid a celor mai importante probleme ale energeticii noastre.

Directivele Congresului al XIX-lea al Partidului Comunist al Uniunii Sovietice, oglindind grija pentru desfăşurarea cercetărilor ştiinţifice, trebue să constitue un îndreptar permanent şi pentru munca Institutului de Energetică.

« Să se îmbunătăţească activitatea Institutelor de Cercetări Ştiinţifice şi activitatea ştiinţifică a şcolilor superioare, să se folosească mai complet forţele ştiinţifice pentru rezolvarea problemelor deosebit de importante ale economiei naţionale, pentru generalizarea experienţei înaintate, asigurându-se o largă aplicare practică a descoperirilor ştiinţifice. Oamenii de ştiinţă să fie sprijiniţi prin toate mijloacele în elaborarea problemelor teoretice şi să se întărească legătura dintre ştiinţă şi producţie ».

Imbunătăţindu-şi metodele de muncă, desfăşurând larg critica şi autocritica, punându-şi toate forţele în slujba construirii socialismului în ţara noastră, cercetătorii ştiinţifici ai Institutului de Energetică al Academiei R.P.R. se vor strădui să fie demni de sprijinul nepreţuit şi de marea încredere a Partidului şi Guvernului.

I. M. POSTNICOV, *Proiectarea mașinilor electrice*. Gosudarstvennoe izdatelstvo tehnicescoi literaturî, S S S R, Kiev, 1952, 736 pagini, 243 figuri.

In anul 1952 a apărut în U.R.S.S. un nou tratat de proiectarea mașinilor electrice, întocmit de Prof. I. M. Postnicov. Este al doilea tratat de acest fel după cel al lui N. V. Vinogradov și P. S. Sergheev, apărut în anul 1949.

Tratatul cuprinde două părți.

O primă parte, cuprinzând capitolele I, II și III, tratează în mod unitar, o singură dată pentru toate mașinile electrice problemele principale legate de proiectarea mașinilor electrice și anume:

1. Metodologia generală a proiectării mașinilor electrice.
2. Calculul magnetic.
3. Parametrii electrici.
4. Pierderile și randamentul.
5. Incălzirea și ventilația.
6. Calculele mecanice.

Tratarea acestor capitole, expuse în mod unitar pentru toate mașinile electrice se întâlnește și în alte tratate și cursuri de mașini electrice, de exemplu în tratatul de proiectare a mașinilor electrice, de N. V. Vinogradov și P. S. Sergheev.

Problemele expuse în cuprinsul acestor capitole sunt tratate în cartea lui I. M. Postnicov metodic și unitar, ceea ce ușurează modul de expunere a celei de a doua părți, în care se tratează, pe rând, proiectarea fiecărei categorii de mașini electrice.

Remarcabil este primul capitol al metodologiei generale a proiectării mașinilor electrice. Acest capitol constă, la alți autori, dintr'o expunere a modului de determinare a dimensiunilor principale ale mașinii. In tratatul lui I. M. Postnicov, acest capitol constitue un studiu critic, de ansamblu și de sinteză al criteriilor după care trebue să se facă proiectarea mașinilor electrice, pentru a se ajunge la o soluție optimă. Nu lipsesc din aceste criterii nici considerațiile de economie, adică de realizare a unui cost cât mai redus, bineînțeles în cadrul numai al principiilor de proiectare și de calcul, fără a se intra în problemele de ieftinire a procesului de producție, care își găsesc locul în tratatele de tehnologia fabricării mașinilor electrice.

Calculul mecanic este redat atât cât este necesar într'un tratat de proiectare, care are desigur în vedere în primul rând calculul electric. Pentru calcule mecanice mai detaliate ale tuturor părților mașinii, autorul trimite la tratatul foarte complet și desvoltat al lui Alexeev.

Acest capitol al calculelor mecanice nu cuprinde și o expunere a construcției mașinilor. Elemente constructive sunt date însă pentru fiecare categorie de mașini în parte, acest lucru făcându-se însă cu o oarecare economie.

Un capitol care lipsește din această primă parte a tratatului lui I. M. Postnicov este acela privind înfășurările.

In partea a doua a tratatului lui I. M. Postnicov găsim noțiuni de înfășurare la fiecare din cele trei categorii de mașini în parte, sincrone, asincrone și de curent continuu, ele fiind însă oarecum sumare.

In partea a doua a tratatului său, I. M. Postnicov expune pe rând, proiectarea fiecăreia din cele trei categorii de mașini electrice; mașina sincronă, mașina asincronă și mașina de curent continuu, la sfârșit dând în mod mai sumar, proiectarea transformatorului. Este o aplicare a celor stabilite în prima parte a lucrării, completate cu ceea ce este deosebit sau specific la fiecare categorie de mașini în parte. Exemplele de calcul, atât cele care figurează la fiecare categorie de mașini în parte, cât și cele șase din urmă, sunt foarte bine alese și foarte instructive, folositoare în special pentru studenții institutelor politehnice.

Lucrarea cuprinde și date privind proiectarea turbogeneratorilor, dar nu găsim nimic privitor la proiectarea mașinilor alternative cu colector.

Materialul este tratat la un nivel superior.

Se dă în general demonstrarea formulelor, în afară de unele mai complicate, pentru care se trimite la bibliografie.

Caracteristic este faptul că în acest tratat găsim o serie de aspecte şi de metode noi de calcul, deosebite de cele pe care le întâlnim în celelalte tratate sovietice, ca tratatele lui L. M. Piotrovschi sau al lui P. S. Sergheev. Citǎm între acestea:

1. Metoda de determinare a dimensiunilor geometrice ale maşinii şi stabilirea unei constante universale.
2. Consideraţiile de ordin economic şi modul cum ele intervin în dimensionarea maşinii.
3. Calculul încălzirii în regimul tranzitoriu şi permanent.
4. Calculul pierderilor de suprafaţă.
5. Metoda de calcul a caracteristicelor de pornire ale motoarelor sincrone.
6. Precizări la diagrama circulară a motorului asincron.
7. Calculul motoarelor asincrone în dublă colivie şi cu crestături adânci.
8. O metodă de determinare a dimensiunilor transformatorilor şi maşinilor, atunci când se dau pierderile în procente de repartizare a acestor pierderi şi a evaluării lor, ţinând seama de valoarea cerută pentru tensiunea de scurtcircuit.

O inovaţie este sistemul de unităţi pe care îl propune şi îl întrebuinţează I. M. Postnicov.

Două sunt până astăzi sistemele pe care le întrebuinţează constructorii de maşini electrice.

Unul este sistemul combinat CGS em clasic practic, cu MKS raţionalizat, în care se conservă din sistemul CGS em, unităţile fundamentale, cm, g, s, pentru cele mai multe dintre unităţile electrice (de intensitate, de tensiune, de rezistenţă etc.) luându-se însă multipli sau submultipli ai unităţilor fundamentale. Pentru flux (∅) şi inducţie magnetică (B) se păstrează unităţile fundamentale maxwell-ul şi gauss-ul, dar pentru câmpul magnetic (H) s'a renunţat la unitatea fundamentală, cersted-ul şi s'a adoptat amperspira/cm, care este un submultiplu al unităţii de câmp magnetic (amperspira/m) din sistemul MKS raţionalizat. Este un sistem lipsit teoretic de unitate, dar practic foarte comod şi în concordanţă cu uzanţa laminăriilor care dau curba de magnetizare a tolelor de fier $B = f(H)$ în gaussi pentru B şi în amperspire/cm pentru H.

Un al doilea sistem este sistemul MKS raţionalizat, care este mult mai logic, el fiind un sistem unitar în sensul că întrebuinţează numai unităţile fundamentale ale sistemului, fără nicio altă derogare decât că, pentru câmpul magnetic întrebuinţează tot amperspira/cm, submultiplu al unităţii fundamentale care este amperspira/m. Inconvenientul acestui sistem este că unitatea — metru este prea mare pentru dimensiunile obişnuite ale maşinilor electrice şi, de aceea, se renunţă adesea la ea şi se lucrează în centimetri.

Primul sistem este încă până astăzi cel mai întrebuinţat. Este sistemul întrebuinţat în tratatul lui P. S. Sergheev, care în calculul maşinilor electrice reprezintă şcoala din Moscova, şi este şi sistemul întrebuinţat în general şi la noi, atât în fabricile de maşini electrice, cât şi în Institutul Politehnic.

In ideea de a folosi un sistem de unităţi care să fie în acelaşi timp un sistem unitar (coerent), dar şi un sistem care să fie cât mai potrivit pentru dimensiunile şi parametrii obişnuiţi ai maşinilor electrice, I. M. Postnicov a imaginat o variantă a sistemului MKS raţionalizat, pe care o numeşte sistemul practic raţionalizat. In cadrul acestei variante păstrează din sistemul MKS, toate unităţile electrice şi magnetice uzuale (amper, volt, ohm, coulomb, joule, watt, amperspira, henry, weber, farad), dar din cele trei unităţi fundamentale se păstrează numai secunda, înlocuindu-se metrul cu centimetrul, iar unitatea de masă, prin faptul că se introduce centimetrul şi se păstrează unităţile electrice, rezultă a fi joulul $\frac{sec^2}{cm^2} = 10^4$ kilograme masă. Toate unităţile în care intră centimetrul în locul metrului se schimbă în consecinţă (as/cm în loc de as/m; joule/cm, în loc de joule/m = newton, weber/cm^2 în loc de weber/m^2 pentru inducţia magnetică, $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ $\frac{henry}{cm}$ în loc de $0{,}4 \cdot 10^{-8}$ $\frac{henry}{m}$ pentru permeabilitatea vidului).

Este în definitiv un sistem nou de unităţi, foarte potrivit pentru calculul şi dimensionarea maşinilor electrice, dar care, desigur, nu va fi găsit tot atât de potrivit în alte domenii, mai ales în cele în care intervin ca mărimi primordiale masa şi greutatea, ceea ce nu este cazul la maşinile electrice.

In rezumat, tratatul de proiectarea maşinilor electrice de I. M. Postnicov este un tratat destul de complet de proiectarea maşinilor electrice, în care proiectantul are la îndemână tot ceea ce îi este

necesar pentru a proiecta o bună mașină electrică, găsind în același timp atât teoria proiectărilor cât și partea practică, ambele deopotrivă de bine tratate.

Este un tratat la un nivel superior, universitar, și cu o foarte bună metodică.

I. S. Gheorghiu

C. A. CRUG, *Bazele electrotehnicii*. Editura Tehnică, 1952, 388 pagini, 203 figuri.

Acest prim volum al lucrării «Bazele electrotehnicii» este constituit din trei mari capitole: Câmpul electric, Curentul continuu, Câmpul magnetic, de o întindere asemănătoare între ele.

Primul capitol, *Câmpul electric* cuprinde în mare măsură ceea ce de obicei se cuprinde în electrostatica aplicată în tehnică.

Astfel, printre principalele chestiuni expuse în acest capitol relevăm: proprietățile generale ale câmpului electric și ale inducției electrice, proprietățile dielectricilor, forțele în câmpul electric, energia câmpurilor electrice, câmpul diferitelor forme de corpuri electrizate, condensatorii, reprezentarea conformă a câmpurilor bidimensionale, etc.

Al doilea capitol, *Curentul continuu*, se extinde de asemenea asupra a o serie de proprietăți conținute în electrocinetică. Inafară de proprietățile fundamentale ale curentului continuu, ca de exemplu legea Ohm și legile Kirchoff, cu diversele lor aplicații, acest capitol se ocupă de legea energetică Joule-Lenz, de transportul energiei pe rețele simple, de fenomenele de conductibilitate ale conductorilor și electroliților, de elementele secundare (acumulatorii), de fenomenele termoelectrice și fotoelectrice, de descărcarea în vid, în gaze, în arc, de curenții de deplasare, etc.

In sfârșit, al treilea capitol, *Câmpul magnetic*, conține expunerea generală a fenomenelor de electromagnetism, insistându-se mai ales asupra chestiunilor în corelație cu tehnica.

Acest capitol, după cum este și natural, are cea mai mare întindere. Prezentarea sa are ca principal conținut: câmpul magnetic și câmpul de inducție, acțiunea mutuală a curenților, fluxul magnetic, potențialurile scalar și vector ale câmpului magnetic, ecuațiile Maxwell, curentul într'un câmp magnetic, dipolii magnetici, fenomenele de para- și diamagnetism, feromagnetismul, proprietățile materialelor feromagnetice, câmpul magnetic în vecinătatea maselor de oțel, elipsoidul feromagnetic într'un câmp omogen, circuitele magnetice, magneții permanenți, inducția electromagnetică, autoinducția și inducția mutuală, energia câmpului magnetic, forțele și lucrul mecanic în sistemele electromagnetice, descărcarea periodică și aperiodică a unui condensator, fenomenele la închiderea și deschiderea de circuite cu inductanțe, sistemele de unități etc.

Caracteristicele esențiale ale expunerii acestui volum sunt în linii generale următoarele:

Cele trei capitole ale volumului cuprind în ele de fapt bazele fizice ale electrotehnicei. In felul acesta noțiunile și mărimile fizice de bază sunt prezentate pe baze unitare și concordante cu restul expunerii fenomenelor electrotehnice care urmează în volumul următor.

Această prezentare unitară are importanța ei într'o expunere de ansamblu destinată învățământului superior. In acest volum se scot în evidență cele trei grupe de fenomene care stau de fapt la baza fenomenelor fizice din electricitate și electrotehnică și anume circuitul electric, câmpul electric și câmpul magnetic, care corespund anumitor prezentări simetrice între ele, după cum se scoate în evidență în tabloul Nr. 7 din lucrarea la care ne referim:

Curentul electric
Sarcina electrică
Fluxul magnetic

Simetria între sarcina electrică Q și fluxul magnetic $\varnothing$ nu este numai o simplă întâmplare matematică, ci are o bază fizică. Această corelație fizică între Q și $\varnothing$ a fost relevată de Academicianul V. F. Mitchevici și apoi folosită de Profesorul P. L. Calantarov în sistemul său simetric.

In concordanță cu realitatea fizică, noțiunea de masă magnetică, nu mai apare în expunerea fenomenelor magnetice. In consecință logică, cu aceeași realitate fizică, nici noțiunea de «magnetostatică» nu mai apare. Fenomenele magnetice nu au la baza lor fizică proprietăți de «magnetostatică», identice cu proprietățile de electrostatică din electricitate.

Deși aceste trei capitole fac parte din domeniul fizicii electricității, expunerea este prezentată fără a se recurge la sistemul Gauss, astfel încât și din acest punct de vedere expunerea este caracterizată printr'o prezentare unitară, dela proprietățile fizice de bază, la concluziile și aplicațiile electrotehnice.

Autorul relevă cu drept cuvânt, în capitolul sistemelor de unități, că afirmația, care se mai face uneori, că sistemele C.G.S.

em şi C.G.S.es s'ar baza pe trei unităţi fundamentale «nu este fundată» după propria sa expresie.

Autorul arată că introducând $\mu_0 = 1$, adoptăm de fapt o a patra unitate fundamentală.

In acest volum, pe măsura expunerii fenomenelor fizice electrice şi magnetice, se dau metode de bază pentru operaţiile de măsurare, ca de exemplu: metoda pentru măsurarea rezistenţelor, metoda de compensaţie pentru măsurări de forţe electromotoare, galvanometru balistic, măsurători magnetice, etc.

Intr'un subcapitol special se dau principii de constituire şi funcţionare a maşinilor electrice.

Prezentarea matematică se face în regim raţionalizat.

Volumul nu este însoţit de calcule şi probleme. Aceasta este explicabil întrucât autorul a publicat separat un volum cuprinzând o colecţie de probleme.

In linii generale, volumul este prezentat la un nivel ştiinţific ridicat şi poate fi urmărit cu mult folos atât de studenţii învăţământului superior, cât şi de inginerii şi oamenii de ştiinţă care au nevoe a se orienta în domeniul atât de vast al electricităţii şi electrotehnicii.

Păcat că la imprimarea acestui volum tradus în limba română, au scăpat un număr mare de erori, astfel încât a fost nevoie să se adauge o erată cu 60 de corectări, care nu cuprinde totuşi totalitatea erorilor de tipar.

Apariţia acestui volum, tradus în limba română, coincide aproape, cu apariţia în limba rusă, în 1952, a unei ediţii a *Bazelor Electrotehnicii*, publicată de un colectiv sub redacţia lui C. A. Crug.

Această nouă ediţie este întocmită pe baze în oarecare măsură modificate faţă de ediţia după care s'a făcut traducerea în limba română.

Materia conţinută în întreg volumul I al ediţiei a VI-a, după care s'a făcut traducerea în limba română, este în parte comprimată, în noua ediţie, într'un singur capitol, cu denumirea *Noţiunile şi relaţiile fizice de bază* (cap. I), iar restul este inserat în celelalte capitole ale noii ediţii, având o sistematizare în parte modificată şi bazându-se pe o altă proporţie în desvoltarea conţinutului.

In noua ediţie, unele prezentări au fost în parte adaptate la unele precizări noi introduse în tehnică. Astfel, de exemplu, în domeniul unităţilor, s'a introdus în noua ediţie, sistemul practic absolut, bazat pe patru unităţi fundamentale M.K.S.A., unitar atât pentru mărimile electrice, cât şi magnetice.

Intr'un tablou se dă corelaţia între unităţile noului sistem practic M.K.S.A. şi unităţile vechilor sisteme C.G.S.em şi C.G.S.es — Gausse.

C. Budeanu

I. M. MARCOVICI, *Sisteme energetice şi regimurile lor*. Gosudarstvennoe energheticescoe izdatelstva, Moscova-Leningrad, 1952, 312 pagini.

Lucrarea lui I. M. Marcovici *Sisteme energetice şi regimurile lor* cuprinde un studiu documentat al celor mai importante probleme teoretice şi practice care se pun în acest domeniu. Sunt citate un mare număr de lucrări de specialitate şi se aduc de asemenea şi contribuţii originale.

Tratând problema stabilităţii statice a sistemelor interconectate, autorul face o competentă discuţie asupra diferitelor metode de calcul, insistând asupra criteriilor $\frac{dQ}{dU}$ şi $\frac{dP}{df}$, care sunt aplicate în ultimul timp din ce în ce mai mult. Pentru stabilitatea dinamică se arată mai întâi dificultăţile unui calcul analitic exact şi se expune apoi metoda modernă de calcul cu ajutorul diagramelor construite pe baza timpului fictiv.

In capitolul *Calitatea energiei* se expune problema reglajului automat de tensiune şi de frecvenţă (reglajul aşa numit frecvenţă — putere) şi se trece apoi la importanta problemă a economicităţii sistemelor energetice. Se stabilesc o serie de principii şi de relaţii, pe baza cărora se pot aprecia avantajele din punct de vedere economic ale diferitelor soluţii tehnice, cu privire la problema compensării factorului de putere, reglajul automat, aplatisarea curbei de sarcină, etc.

In ultima parte a lucrării se dau numeroase tablouri şi diagrame, precum şi exemple de calcul pentru regimurile de funcţionare ale sistemelor energetice. Se stabilesc mai întâi schemele echivalente pentru generatori, transformatori, linii şi consumatori, după care se trece la calculul funcţionării unui generator şi apoi a unui sistem interconectat. Calculul stabilităţii dinamice este făcut prin metoda analitică exactă (metoda «pas cu pas»), arătându-se însă în continuare o serie de simplificări ce pot fi introduse fără a avea erori prea

mari. Se descrie apoi metoda de lucru pentru calculul stabilității cu ajutorul unui model electric, după care se trece la metoda cea mai utilizată în prezent, pe baza timpului fictiv obținut din diagrame.

Pentru stabilitatea statică se dau exemple de aplicare a diferitelor criterii $\frac{dQ}{dU}, \frac{dP}{df}$ etc. In continuare se expun o serie de calcule simplificate, relativ la distribuția puterilor (metoda dată de C. A. Sovalov), calculul curenților de scurtcircuit cu ajutorul curbelor de decrement etc.

Lucrarea este scrisă la un nivel înalt, citând întotdeauna cazurile cele mai generale ale problemelor și arătând în ce mod se pot particulariza și simplifica. Ultima parte a lucrării constitue un bogat material pentru institutele de proiectare, deoarece în această parte se sintetizează cele mai practice metode de calcul.

E. Potolea

A. M. FEDOSEEV, *Protecția cu relee a sistemelor electrice*. Gosenergoizdat, 1952, 480 pagini, 532 figuri.

In domeniul tehnicii protecției prin relee, au existat până în prezent prea puține manuale care să trateze în mod amănunțit, toate aspectele acestei probleme. Este adevărat că s'au scris foarte multe lucrări precum și foarte multe articole, în revistele de specialitate, însă fiecare din acestea se ocupă numai de o mică parte a protecției prin relee, astfel încât era foarte greu de a avea o privire generală sau o orientare justă în acest domeniu.

Din acest punct de vedere, cartea profesorului A. M. Fedoseev, recent apărută, umple un gol în literatura tehnică modernă.

Autorul își împarte tratatul său în 12 capitole, fiecare capitol tratând despre un anumit tip de protecție aplicat diverselor părți ale instalațiilor electrice din sistemele energetice.

In primul capitol se tratează despre avariile posibile ale rețelelor aeriene sau în cablu; sunt studiate toate cazurile posibile de scurtcircuite simetrice și asimetrice, folosindu-se metoda de calcul a coordonatelor simetrice. O mențiune deosebită se dă regimurilor anormale de funcționare, deosebite de regimurile de avarie.

Capitolul următor se ocupă de protecția de curent; se dau definițiile exacte ale diverselor tipuri de protecții de curent, se descriu releele și se dau formulele de calcul pentru fiecare caz în parte.

Trebue remarcată deosebita importanță ce se dă protecției de curent cu tăiere rapidă, foarte mult utilizată în U.R.S.S., și care permite selectarea defectelor fără temporizare.

In capitolul al treilea autorul tratează despre protecții de curent și tensiune și în special despre protecția cu blocaj direcțional. Se descriu releele direcționale sovietice moderne, de tip IMB-171 și B-178/1.

Capitolul al patrulea se ocupă cu protecția de distanță, arătând diversele tipuri utilizate în tehnica modernă. Se dau toate datele de calcul al protecțiilor de distanță cu demaraj și de impedanță minimă; se descrie de asemenea, în amănunt, panoul de protecție de distanță tip PZ 156.

Capitolul următor se ocupă cu protecția diferențială, descriindu-se principiile acestei protecții și insistându-se în mod deosebit asupra protecției diferențiale transversale și longitudinale. Trebue remarcată protecția diferențială longitudinală de tip RDL, care a dat rezultate deosebit de bune pentru liniile scurte.

In capitolul al șaselea sunt tratate protecțiile de înaltă frecvență, care — după cum se știe — reprezintă tipul cel mai modern de protecție pentru liniile de înaltă și foarte înaltă tensiune. Se descrie, în amănunt, protecția de tip PZ 164, cu demaraj pe baza măsurii componentei inverse de tensiune.

După analizarea, în acest capitol, a diverselor tipuri de protecție, se trece, în capitolele următoare, la studierea amănunțită a principiilor de protecție aplicate diverselor părți ale instalațiilor.

Se studiază astfel protecția liniilor de înaltă tensiune, a generatorilor sincroni, a transformatorilor, a blocurilor generator-transformator, a barelor, precum și protecția motoarelor asincrone și sincrone.

Autorul arată, în amănunt, noile scheme de protecție a acestor instalații, modul lor de calcul și considerații de exploatare. Trebue observată folosirea tehnicii celei mai moderne în acest domeniu (de exemplu întrebuințarea elementelor nelineare).

După cum arată autorul în introducere, prin utilizarea principiilor raționale de protecție, s'a ajuns în U.R.S.S. ca, la 99% din totalul accidentelor din anul

1949, protecţia să acţioneze just (în 1944 — 97,8%, în 1946 — 98,9%).

Este deci firesc ca şi tehnicienii din R.P.R. să se preocupe din ce în ce mai mult de această problemă, datorită mai ales desvoltării mari a energeticii în cadrul Planului de Electrificare. Pentru aceştia, lucrarea lui A. M. Fedoseev este deosebit de preţioasă.

C. Penescu

A. B. CELIUSTCHIN, *Automatizarea electrică a laminoarelor*. Metallurghizdat, Moscova, 1952, 279 pagini, 184 figuri, 8 tablouri.

Automatizarea acţionărilor electrice ale laminoarelor a cunoscut un progres nemaiîntâlnit în U.R.S.S., datorită colaborării rodnice dintre oamenii de ştiinţă şi tehnicienii uzinii, care a făcut posibilă pătrunderea tot mai masivă a tehnicii noi în acest domeniu atât de important pentru economia naţională. Lucrarea lui A. B. Celiustchin reprezintă, după cum spune în introducere chiar autorul, una din primele încercări de a sistematiza experienţa nu prea îndelungată care există în acest domeniu.

In capitolul I sunt prezentate principalele elemente componente ale schemelor de automatizare: tuburile electronice şi tiratronul, celulele fotoelectrice, releele de timp de diferite categorii, redresorii uscaţi, amplificatorii electromecanici, etc. După o scurtă dar foarte clară descriere a principiului de funcţionare şi a fenomenelor fizice legate de acesta, se dau pentru fiecare element una sau două scheme tipice, care explică funcţia îndeplinită de acesta. De asemenea, sunt tratate dispozitivele pentru transmiterea la distanţă a unghiurilor şi a deplasărilor liniare: selsinele, cu variantele selsin-transformator şi selsin-potenţiometru, transductorii inductivi de deplasare liniară cu aplicaţii foarte interesante, cum ar fi un aparat sensibil la deformaţiile batiului laminorului etc. Demn de relevat este faptul că în acest capitol sunt descrişi şi amplificatorii magnetici, care nu sunt încă utilizaţi în sistemele de automatizare a laminoarelor, dar ale căror proprietăţi interesante justifică presupunerea că ei vor fi utilizaţi într'un viitor apropiat. Pe larg este descrisă maşina electrică amplificatoare (amplidina), cu date constructive, proprietăţi de funcţionare şi precauţiuni de luat în timpul exploatării.

In capitolul II se descrie comanda prin relee şi contactori a sistemelor de acţionare electrică, atât a celor alimentate dela reţeaua de tensiune constantă, cât mai ales a sistemului Leonard, atât de mult utilizat în metalurgie, accentuându-se în special asupra regimurilor tranzitorii şi forţării excitaţiei, necesară pentru scurtarea timpului de accelerare. Se relevă în deosebi particularităţile acestui sistem în schemele de automatizare a acţionărilor auxiliare ale laminorului, ţinând seama de specificul lucrului acestuia, cum ar fi de exemplu posibilitatea de blocare a sistemului de presare, care impune o caracteristică externă specială a generatorului, realizabilă la generatorul cu trei înfăşurări.

In capitolul III autorul se ocupă de reglajul automat al acţionărilor laminorului. După o scurtă expunere principială asupra sistemelor de reglaj în general, sunt descrise principalele mijloace de automatizare a reglajului tensiunii generatorilor dela grupurile convertizoare ale laminoarelor reversibile şi ale celor nereversibile şi a reglajului vitezei motoarelor. Interesante sunt datele tehnice şi explicaţiile referitoare la transformatorii stabilizatori, necesari pentru asigurarea stabilităţii schemelor ce utilizează amplidine. De asemenea sunt descrise câteva sisteme moderne de reglaj al tensiunii benzii laminate la rece, printre c re şi un sistem, cu amplidină, propus de autor, care foloseşte capacitatea dinamică reprezentată de un motor. Autorul reia, de altfel, şi în alt loc problema destul de puţin cunoscută a utilizării unei astfel de capacităţi dinamice ca mijloc de forţare a excitaţiei motoarelor. In sfârşit, acest capitol se ocupă de reglajul automat al excitaţiei motoarelor sincrone şi al sarcinii motoarelor asincrone, probleme foarte importante pentru economia consumului de energie electrică.

In tehnica modernă a reglajului automat au început să ocupe un loc deosebit amplidinele, datorită caracteristicelor lor avantajoase, siguranţei în funcţionare şi uşurinţei de întreţinere. Aceasta explică pentru ce capitolul IV este consacrat în întregime comenzii prin amplidină a acţionărilor auxiliare şi principale ale laminorului. Din explicarea funcţionării schemelor respective rezultă marea elasticitate a performanţelor amplidinei, datorită existenţei numeroaselor înfăşurări de comandă, legate de rezistenţe neliniare.

De asemenea este discutată problema forţării excitaţiei, atât de importantă în schemele unde amplidina serveşte drept subexcitatrice.

Funcţionarea laminoarelor moderne de mare productivitate este de neconceput astăzi fără automatizarea comenzilor diferitelor mecanisme. In proiectarea schemelor respective trebue acordată cea mai mare atenţie particularităţilor tehnologice ale procesului, precum şi corectei succesiuni în timp a funcţionării diferitelor mecanisme.

De aceste probleme se ocupă capitolul V care, dată fiind imposibilitatea de a da soluţii concrete pentru toate laminoarele, indică numai soluţiile cele mai generale, precum şi principiile de construire a schemelor de automatizare pentru transportorii cu role, mesele laminorului, căruciorul pentru lingouri, dispozitivul de presare, etc. Explicarea funcţionării acestor scheme se face în strânsă legătură cu cerinţele impuse funcţionării mecanismului, în interdependenţă cu funcţionarea celorlalte mecanisme, care sunt enunţate în prealabil.

Lucrarea lui A. B. Celiustchin se distinge prin bogăţia materialului prezentat şi prin claritatea şi caracterul concret al expunerii, însoţită întotdeauna de aprecieri critice bazate pe practică precum şi de date numerice. Lucrarea cuprinde tablouri cu date tehnice, foarte necesare pentru orientarea cititorului, precum şi descrierea a numeroase aparate şi scheme elaborate de industria sovietică. Schemele alese sunt dintre cele mai tipice şi sunt explicate pe larg, iar modul de dozare a materiei vădeşte caracterul tehnic progresist al lucrării, care promovează cele mai noi tendinţe din domeniul automatizării electrice. Lucrarea este deosebit de preţioasă pentru inginerii şi tehnicienii noştri prin prezentarea acestor probleme, care au fost rezolvate în mod strălucit de tehnica sovietică şi care, în condiţiile planului cincinal, devin pe zi ce trece mai actuale în industria ţării noastre.

I. Vaisman

A. WINTER, *Energia electrică în U.R.S.S.* Editura în limbi străine, Moscova, 1952, 80 pagini.

Academicianul A. Winter, cunoscutul specialist sovietic în energetică, prezintă lumii în lucrarea de care ne ocupăm, situaţia energiei electrice în U.R.S.S.

Lucrarea cuprinde o introducere şi şase capitole.

In introducere autorul arată importanţa ce se acordă electrificării în lucrările lui Lenin şi Stalin.

Primul plan de electrificare GOELRO a fost adoptat la Congresul al VII-lea al Sovietelor, în Decembrie 1920, când Lenin a formulat lozinca, rămasă celebră: « Comunism, este puterea Sovietelor, plus electrificarea întregii ţări ».

In primul capitol autorul analizează *Industria electrică în vechea Rusie.* Deşi Rusia era o ţară cu imense resurse de energie, ocupa în lume locul al 15-lea în ceea ce priveşte producţia de energie electrică.

In al doilea capitol autorul se ocupă de *Industrializarea socialistă şi crearea în U.R.S.S. a industriei electrice.* Planul GOELRO prevedea refacerea, perfecţionarea şi regruparea în complexe a uzinelor generatoare existente şi construirea în 10—15 ani a 20 de centrale termice şi 10 hidraulice, cu o putere de 1.500.000 kw.

In capitolul următor se tratează despre *Principiile de organizare a industriei electrice în U.R.S.S.* Ca prim principiu în electrificarea U.R.S.S. s'a pus ideea construcţiei de mari centrale, care să furnizeze energia necesară pentru regiuni cât mai întinse.

Un alt principiu a fost stabilirea complexelor energetice prin interconexiuni.

S'a căutat pe de altă parte să se utilizeze în proporţie cât mai mare energia hidraulică şi combustibilii locali de valoare inferioară.

Un alt capitol tratează despre *Progresele industriei electromecanice şi electrificarea economiei naţionale în U.R.S.S.* Industria electrică sovietică se desvoltă foarte rapid, încât în al treilea cincinal nu mai sunt necesare produse de import pentru echiparea centralelor electrice.

Capitolul următor se ocupă de *Industria electrică în U.R.S.S. în cursul Marelui Război pentru Apărarea Patriei şi al cincinalului de după război.* Deşi în teritoriile ocupate în timpul războiului se găsea şi marea centrală hidroelectrică dela Nipru, potenţialul industrial al Uniunii Sovietice a crescut în 1942—1944. In acest timp s'a văzut importanţa interconectării centralelor regionale în complexe energetice. Prin noile lucrări executate în cincinalul 1946—1950, U.R.S.S. ocupă al doilea loc în lume din punctul de vedere al producţiei de energie electrică.

In aceşti ani se trece la electrificarea agriculturii pe o scară tot mai întinsă; se electrifică astfel numeroase colhozuri.

In ultimul capitol autorul descrie *Marile şantiere ale comunismului*. Necesitatea ca producţia industrială să ia o cât mai mare desvoltare implică o importantă creştere a producţiei de energie electrică. Din aceste considerente s'a trecut la construirea marilor centrale: Kuibîşev de 2 mil. kW., Stalingrad cu 1,7 mil. kW., uzinele dela barajul Tahia-Tah, etc. Concomitent se vor face irigaţii pe suprafeţe întinse, înglobând 28 milioane de hectare. Noile uzine depăşesc centralele americane Grand-Coulée şi Boulder Dam, cele mai mari din lume.

Pentru transportul energiei electrice la distanţa de 1000 km se vor utiliza curenţi alternativi sub 400 kW.

Odată cu producerea energiei electrice, amenajările hidraulice permit crearea unor importante căi de navigaţie pe Volga, Amu-Daria, Don şi Nipru.

Prin irigarea atâtor regiuni secetoase şi prin crearea a numeroase rezervoare de apă, se va contribui la formarea unei noi vegetaţii, care va reduce seceta şi astfel se va ameliora climatul. Marile şantiere ale comunismului arată puterea U.R.S.S. şi politica de pace a guvernului său.

C. Parteni Antoni

N. A. TIPER, *Comparaţie tehnico-economică a sistemelor de încălzire centralizată, la clădirile de locuit.* Moscova 1952, 78 pagini, 5 diagrame.

In această lucrare se determină, pe o bază ştiinţifică, posibilităţile de alegere a sistemului de încălzire centralizată, la un centru aglomerat, pe baza indicilor tehnico-economici.

In cuprinsul lucrării, se tratează, în special, factorii care au o influenţă preponderentă asupra indiciilor, ajungându-se la concluzia că, într'o mare măsură, aceştia depind de soluţia arhitecturală a clădirilor şi de proprietăţile termotehnice ale materialelor de construcţii.

Analizând factorii arhitecturali într'o serie de tablouri statistice şi de diagrame, şi anume numărul de etaje al clădirii, raportul dintre înălţimea clădirii şi suprafaţa construită etc., ni se dă posibilitatea de a putea integra orice sistem de construcţie într'una din formulele date, pentru determinarea indicelui respectiv.

In ceea ce priveşte proprietăţile termotehnice ale clădirii şi stabilirea unui indice de pierdere de căldură în Kcal m^2 h°C, se demonstrează că cea mai mare influenţă o are coeficientul de trecere al căldurii prin elementele de construcţie şi în special prin ziduri.

Pentru a pune la dispoziţia cercetătorilor posibilitatea determinării indicilor de pierdere a căldurii, autorul stabileşte formule pentru fiecare sistem de construcţie în parte, dând totodată tablourile cu aceste valorii direct calculate pentru diferite tipuri uzuale de clădiri de locuit.

Trecând apoi la aflarea unui indice economic, se stabilesc relaţiile care ne pot da greutatea materialului feros şi neferos ce intră în componenţa diferitelor tipuri de instalaţii şi apoi valoarea acestui material care, raportat la unitatea de construcţie şi Kcal, ne va da un indice economic. In lucrare găsim de asemenea calculate valorile acestui indice pentru tipurile uzuale de instalaţii.

Pe baza acestor trei indici, şi anume, arhitectural, al pierderilor de căldură şi al costului instalaţiei, se trece la analizarea influenţei fiecăruia dintre ei asupra alegerei unui sistem de încălzire, ţinând seama de data aceasta şi de cheltuelile de exploatare ale sistemului.

Din analiza făcută, se ajunge la concluzia că densitatea clădirilor pe teren, în centrul aglomerat, schimbă raporturile dintre indicii tehnico-economici, ceea ce are ca urmare schimbarea sistemului de încălzire recomandat şi anume:

a) La o densitate medie a construcţiilor pe teren şi la clădiri cu puţine etaje, sunt mai avantajoase sistemele de încălzire raionale faţă de sistemele individuale, deoarece chiar dacă indicele de investiţie este mai mare, indicele de exploatare va recupera diferenţa în foarte scurt timp.

b) La clădirile cu mai multe etaje, sistemele raionale de încălzire devin recomandabile numai în cazul unei densităţi mari a construcţiilor pe teren, deoarece indicele de exploatare nu mai are aceeiaşi eficacitate faţă de cel de investiţii, ca în cazul precedent.

c) La construcţiile cu o densitate mică pe teren şi cu puţine etaje, sistemul raional nu mai este recomandabil.

In ceea ce priveşte adaptarea sistemului de calcul, arătat în lucrare, la clădirile de mare înălţime, autorul ne arată că ea nu este posibilă, deoarece aceste clădiri au elemente specifice care nu se întâlnesc la clădirile obişnuite.

Dan Ştefănescu

C. S. JIRIŢCHI, *Turbine cu gaze pentru aviaţie*. Moscova, 1950, 510 pagini.

Lucrarea Prof. G. S. Jiriţchi, doctor în ştiinţe tehnice, are drept scop să sistematizeze într'o ordine logică şi deductivă noţiunile necesare studiului şi proiectării turbinelor cu gaze pentru aviaţie. Ea este destinată institutelor tehnice superioare de aviaţie, ale căror cunoştinte în domeniul turbomotoarelor de aviaţie sunt completate cu studiul compresoarelor şi cu teoria motoarelor cu reacţie de aviaţie.

Această divizare, raţională din punct de vedere didactic, are avantajul că permite un studiu mai profund al organelor componente ale motorului turbină cu gaz, de importanţă primordială.

Extinsă cu mult peste prevederile programei tematice, lucrarea Prof. G. S. Jiriţchi constitue o adevărată monografie a turbinelor cu gaze utilizate în aviaţie. Pentru studiul termodinamic al turbinei, Prof. Jiriţchi face apel la diagrama I—S a produselor de ardere — la diverse excese de aer elaborată de catedra de motoare a Institutului de Aviaţie din Cazan; diagrama cu axe curbe folosită ţine cont de valoarea reală a căldurilor specifice ale gazelor în funcţie de temperatură. Procesele şi calculele termice sunt studiate pe larg, analizându-se scheme variate, chiar acelea care nu au găsit astăzi încă o aplicare practică, ca de exemplu turbina cu gaze cu ardere la volum constant. De o atenţie deosebită s'au bucurat capitolele privitoare la profilarea şi răcirea paletelor turbinei, de a căror justă realizare depinde însăşi durata de funcţionare a turbinei.

Partea de calcul este bine ilustrată prin studiul paletajului fix şi mobil al discurilor şi arborelor, în condiţiile specifice turbinelor cu gaze, ţinându-se seama atât de tensiunile termice, cât şi de efectul giroscopic al discului rotorului.

De asemenea, manualul se ocupă cu o serie de probleme, nerezolvate încă, aflate în studiu, fie în studiu industrial, fie de laborator, ca: răcirea cu apă a paletelor, ciclul turbinei cu ardere la volum constant, problema temperaturilor mari ale gazelor, etc., arătându-le perspectivele de desvoltare şi căile de urmat pentru cercetătorii în acest domeniu.

Lucrarea Prof. G. S. Jiriţchi este singura lucrare de sinteză în domeniul turbinelor cu gaze de aviaţie; ea este bazată pe studiile amănunţite şi profunde ale oamenilor de ştiinţă sovietici în acest domeniu al tehnicei. Spre deosebire de literatura tehnică din ţările capitaliste, care în acest domeniu prezintă fie părţi disparate într'o formă pur teoretică sau principială, fie aspecte de reclamă a diverselor firme constructoare, lucrarea Prof. G. S. Jiriţchi constitue un aspect concludent al superiorităţii ştiinţei şi tehnicii socialiste, de îmbinare a eforturilor susţinute şi dirijate spre acelaşi ţel final. Astfel, lucrarea ţine seama de studiile Prof. V. V. Uvarov privind caracteristicile turbinelor şi profilarea paletelor, de lucrările Prof. B. S. Stocichin referitoare la teoria turbinelor de aviaţie şi la calculul arborilor şi rotorilor, ale Prof. Snee şi Chirilov, privind ciclurile termice, ale Prof. M. I. Ianovschi, Prof. Culaghin, Levin, etc.

Lucrarea *Turbine cu gaze pentru aviaţie* constitue astfel, prin conţinutul său, o lucrare de bază pentru studenţii, inginerii şi constructorii din domeniul turbomotoarelor de aviaţie, indispensabilă unei bune documentări şi unei orientări juste în acest domeniu.

V. P.

M. M. MASLENNICOV şi M. S. RAPIPORT, *Motoare de avion cu piston*. Oboronghiz, Moscova, 1951, 847 pagini.

Lucrarea *Motoare de avion cu piston* reprezintă un manual pentru Institutele de Aviaţie din U.R.S.S. şi este o revizuire a lucrării lui M. M. Maslennicov publicată de Oboronghiz în anul 1946. Scopul ei este prezentarea noţiunilor generale necesare cunoaşterii motorului de avion modern.

Autorii îşi propun încă dela început să prezinte ansamblul compresor, motor, turbina de gaze şi organe anexe, ca un tot organic. Spaţiul limitat destinat lucrării, care şi aşa este destul de voluminoasă, a făcut ca diferitele capitole ale tratatului să se desvolte totuşi inegal.

Lucrarea cuprinde şapte capitole:

— Teoria proceselor de lucru în cilindrul motorului cu combustibil uşor.

— Teoria funcţionării motoarelor după diferite scheme teoretice.

— Dinamica motorului.

— Cerinţele principale impuse motoarelor de aviaţie cu piston.

— Construcţia organelor principale.
— Sisteme de deservire cu combustibil şi ulei, răcirea.
— Motoare de aviaţie cu combustibil greu.

Din aceste capitole s'a tratat mai desvoltat partea de teorie a proceselor reale; s'au desvoltat foarte puţin problema maşinilor cu palete şi s'a tratat pe scurt problemele calculului de rezistenţă.

Nu au fost tratate deloc problemele speciale ca aprinderea sau aplicarea motorului de avion la helicopter.

Aceste limitări sunt explicabile prin volumul şi caracterul tratatului şi prin faptul că în organizarea învăţământului superior, problemele menţionate se tratează în cadrul altor cursuri.

Autorii indică celor ce vor să aprofundeze anumite probleme, o valoroasă bibliografie de strictă specialitate.

In conţinutul lucrării se dau o seamă de date şi de informaţii generale, cât şi speciale asupra motoarelor sovietice, care sunt privite şi din punct de vedere istoric într'un capitol introductiv.

Lucrarea *Motoare de avion cu piston* reprezintă un manual deosebit de util pentru oricine se interesează de problemele motoarelor de performanţă.

V. P.

INTREPRINDEREA
POLIGRAFICĂ Nr. 4
BUCUREȘTI

C. 1512

Prețul lei 8.—